

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de  
Estructuras



**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

# **MODELIZACIÓN DE IMPACTOS A BAJA VELOCIDAD SOBRE PLACAS SÁNDWICH**

**Autor**

Víctor Criado del Álamo

**Tutoras:**

Inés Iváñez del Pozo

Marta María Moure Cuadrado

Leganés, septiembre 2014



## Índice

Índice .....	2
Índice de Figuras .....	4
Índice de tablas .....	6
<b>1. Introducción.....</b>	<b>7</b>
1.1. Motivación .....	8
1.2. Objetivos .....	9
1.3. Contenido .....	10
<b>2. Antecedentes .....</b>	<b>11</b>
2.1. Introducción a los materiales compuestos .....	12
2.2. Introducción a las estructuras tipo sándwich .....	14
2.2.1. Tipos de pieles.....	15
2.2.2. Tipos de Núcleos .....	16
2.3. Aplicaciones de estructuras tipo sándwich .....	19
2.4. Impactos en estructuras tipo sándwich .....	21
2.4.1. Impactos a alta y baja velocidad. ....	22
2.4.2. Impacto oblicuo.....	24
2.5. Criterios de rotura .....	25
2.5.1. Criterio de Hashin-Rotem.....	25
2.5.2. Criterio de Hashin.....	27
<b>3. Modelización numérica.....</b>	<b>29</b>
3.1. Introducción a la modelización .....	30
3.2. Modelización del impacto .....	30
3.2.1. Modelización geométrica.....	31
3.2.2. Materiales .....	33
3.2.3. Interacciones .....	37
3.2.4. Condiciones iniciales .....	39
3.2.5. Condiciones de contorno .....	40
3.2.6. Mallado.....	41
<b>4. Validación y resultados.....</b>	<b>46</b>

4.1.	Introducción .....	47
4.2.	Validación del modelo numérico .....	47
4.2.1.	Fuerza de contacto máxima .....	47
4.2.2.	Fuerza de contacto frente al tiempo.....	50
4.3.	Resultados .....	51
4.3.1.	Fuerza contacto-Tiempo .....	51
4.3.2.	Energía Cinética-Tiempo .....	52
4.3.3.	Energía Absorbida-Energía de impacto.....	53
4.3.4.	Mapa de tensiones.....	54
<b>5.</b>	<b>Aplicaciones a otros casos.....</b>	<b>57</b>
5.1.	Introducción .....	58
5.2.	Variación de las condiciones de contorno.....	58
5.2.1.	Placa empotrada en dos de sus lados .....	58
5.2.2.	Placa empotrada en todo su contorno .....	63
5.3.	Caso impacto oblicuo .....	68
<b>6.</b>	<b>Presupuesto.....</b>	<b>73</b>
6.1.	Presupuesto detallado.....	74
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros.....</b>	<b>75</b>
7.1.	Conclusiones.....	76
7.2.	Trabajos futuros .....	77
<b>8.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>79</b>

## Índice de Figuras

Fig. 1 Modulo de elasticidad y densidad de distintos materiales [3].....	12
Fig. 2 Estructura sándwich. ....	14
Fig. 3 Dimensiones nucleo panel abeja[6].....	17
Fig. 4 Aplicaciones estructura sandwich; a) Casco corbeta Visby [15]; b) Puente de Uyllander (Amsterdam)[14]; c) Automovil[13].....	19
Fig. 5 Airbus A380 con espuma PMI y Honeycomb en distintas zonas del avión. ....	20
Fig. 6 Impacto oblicuo [25].....	25
Fig. 7 Maquina de ensayo utilizada en los ensayos experimentales [29] .....	31
Fig. 8 Modelo proyectil.....	32
Fig. 9 Modelo Apoyo. ....	32
Fig. 10 Modelo núcleo.....	33
Fig. 11 Modelo pieles .....	33
Fig. 12 Orientación de las pieles de laminado $0^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}$ .....	34
Fig. 13 Orientación de las pieles de laminado $0_2^{\circ}/90_2^{\circ}/0_2^{\circ}$ .....	35
Fig. 14 Curva tensión deformación 51WF .....	36
Fig. 15 Curva tensión deformación 110WF.....	37
Fig. 16 Interacción proyectil con placa.....	38
Fig. 17 Interacción placa con apoyos. ....	38
Fig. 18 Interacción pieles con núcleo .....	39
Fig. 19 Condición de solido rígido para el proyectil. ....	39
Fig. 20 Dirección de la velocidad de impacto.....	40
Fig. 21 Condiciones de contorno de los apoyos.....	41
Fig. 22 Restricción de movimiento del proyectil.....	41
Fig. 23 Mallado del proyectil. ....	42
Fig. 24 Mallado de los apoyos. ....	42
Fig. 25 Análisis de malla de la estructura sándwich.....	43
Fig. 26 Mallado de el nucleo. ....	44
Fig. 27 Mallado de las pieles. ....	45
Fig. 28 Mallado del conjunto entero.....	45
Fig. 29 Comparativa entre las energías de impacto y la fuerza de contacto máxima para el modelo Tipo I (51WF y 3 láminas).....	47
Fig. 30 Comparativa entre las energías de impacto y la fuerza de contacto máxima para el modelo Tipo II (110WF y 3 láminas).....	48
Fig. 31 Comparativa entre las energías de impacto y la fuerza de contacto máxima para el modelo Tipo III (110WF y 6 láminas).....	49
Fig. 32 Comparativa de la curva fuerza de contacto en función del tiempo para un panel de 6 láminas ( $0_2^{\circ}/90_2^{\circ}/0_2^{\circ}$ ) y núcleo 110WF, sometido a un impacto de 21.52 J.....	50
Fig. 33 Curvas fuerza de contacto-tiempo numérica. Comparación entre diferentes energías de impacto. ....	52
Fig. 34 Curvas de energía cinética frente al tiempo para varias energías de impacto. ....	52
Fig. 35 Relación de la energía de impacto con la energía absorbida para estructura sándwich de núcleo 51WF y 3 láminas. ....	53

Fig. 36 Mapa de tensiones para la energía de 3,62 J, a) 25%, b) 50%, c) 75%, d) 100% .....	55
Fig. 37 Mapa de tensiones para la energía de 13,96 J, a) 25%, b) 50%, c) 75%, d) 100% .....	55
Fig. 38 Mapa de tensiones para la energía de 23,31 J, a) 25%, b) 50%, c) 75%, d) 100% .....	55
Fig. 39 Mapa de tensiones para la energía de 23,31 J, para el núcleo de espuma y la placa completa: a) 25%, b) 50%, c) 75%, d) 100% .....	56
Fig. 40 Modelo impacto a baja velocidad en estructuras sándwich con dos lados empotrados. ....	58
Fig. 41 Curvas fuerza de contacto-tiempo numérica. Comparación entre diferentes energías de impacto, caso dos lados de la placa empotrados. ....	59
Fig. 42 Comparación de fuerza de contacto en función del tiempo para el caso apoyado y empotrado dos lados. Energía de 23,31 J. ....	60
Fig. 43 Curvas de energía cinética frente al tiempo para varias energías de impacto, caso de dos lados de la placa empotrados. ....	60
Fig. 44 Comparación de energía cinética en función del tiempo para el caso apoyado y empotrado dos lados. Energía de 23,31 J. ....	61
Fig. 45 Comparación de la energía absorbida con la energía de impacto para los casos biapoyado y biempotrado. ....	62
Fig. 46 Mapa de tensiones para la energía de 23,31 J, para el caso de dos lados empotrados en comparación con el caso apoyado a) 25%, b) 100%, ....	63
Fig. 47 Modelo impacto a baja velocidad en estructuras sándwich con cuatro lados empotrados. ....	63
Fig. 48 Curvas fuerza de contacto-tiempo numérica. Comparación entre diferentes energías de impacto, caso cuatro lados de la placa empotrados. ....	64
Fig. 49 Comparación de fuerza de contacto en función del tiempo para el caso apoyado, empotrado dos lados y empotrado cuatro lados. Energía de 23,31 J. ....	65
Fig. 50 Curvas de energía cinética frente al tiempo para varias energías de impacto, caso de cuatro lados de la placa empotrados. ....	65
Fig. 51 Comparación de energía cinética en función del tiempo para el caso apoyado, empotrado dos lados y todos los lados empotrados. Energía de 23,31 J. ....	66
Fig. 52 Comparación de la energía absorbida con la energía de impacto para los casos biapoyado, biempotrado y todos los lados empotrados. ....	66
Fig. 53 Mapa de tensiones para la energía de 23,31 J, para el caso de dos y cuatro lados empotrados en comparación con el caso apoyado a) 25%, b) 100%. ....	67
Fig. 54 Modelos de impacto a baja velocidad en estructuras sándwich con dos lados empotrados e impacto oblicuo a) 10º, b) 30º, c) 60º. ....	68
Fig. 55. Comparación de fuerza de contacto en función del tiempo para impacto oblicuo de 10º, 30º y 60º. Energía de 3,93 J. ....	69
Fig. 56. Comparación de fuerza de contacto en función del tiempo para impacto oblicuo de 10º, 30º y 60º. Energía de 13,98 J. ....	69
Fig. 57. Comparación de fuerza de contacto en función del tiempo para impacto oblicuo de 10º, 30º y 60º. Energía de 23,31 J. ....	70
Fig. 58. Comparación de la energía residual (J) con la energía de impacto (J) para cada ángulo de impacto. ....	71
Fig. 59. Mapa de tensiones para la energía de 23,31 J, para el caso de impacto oblicuo de 10º, 30º y 60º a) 25%, b) 50%, c) 100%. ....	72

## Índice de tablas

Tabla 1. Resistencia, rigidez y peso en función del espesor del núcleo.....	8
Tabla 2 Tipos de pieles y núcleos. ....	15
Tabla 3 Tipos de estructura sándwich de diferentes espumas y pieles. ....	31
Tabla 4. Propiedades del acero del proyectil .....	34
Tabla 5 Propiedades de las pieles LTM45EL/CF0111 .....	35
Tabla 6 Resistencia de las pieles. ....	36
Tabla 7 Propiedades 51WF.....	36
Tabla 8 Propiedades 110WF.....	37
Tabla 9 Energías y velocidades de impacto.....	40
Tabla 10 Análisis de malla para cada número de elementos.....	44
Tabla 11 Diferencia entre resultados experimentales y numéricos para el modelo Tipo I (51WF y 3 láminas). ....	48
Tabla 12 Diferencia entre resultados experimentales y numéricos para el modelo Tipo II (110WF y 3 láminas). ....	49
Tabla 13 Diferencia entre resultados experimentales y numéricos para el modelo Tipo III (110WF y 6 láminas). ....	49
Tabla 14 Energía de impacto y energía absorbida. ....	54
Tabla 15 Energía de impacto y energía absorbida para el caso biapoyado y biempotrado. ....	62
Tabla 16 Porcentaje de energía absorbida para los tres casos de condiciones de contorno .....	67
Tabla 17 Presupuesto de la modelización numérica.....	74

# 1. INTRODUCCIÓN

---



## 1.1.Motivación

El empleo de estructuras fabricadas con materiales compuestos se ha visto incrementado en las últimas décadas, y en diversos campos de la ingeniería, debido a las ventajas que éstas presentan frente a las que ofrecen las estructuras fabricadas con materiales tradicionales (acero, aluminio, etc).

Un material compuesto por definición es aquel que se forma por unión de dos o más materiales sin que se produzca reacción química entre ellos. De esta manera se consiguen propiedades distintas y superiores a las que presentan los materiales de forma individual.

Las propiedades generales de un material compuesto son: reducción de peso, alta resistencia, alta rigidez, alta resistencia a la corrosión y al desgaste. Estas propiedades son de mucha utilidad, ya que actualmente se busca el diseño de estructuras que produzcan el menor impacto ambiental posible, así como una reducción en su consumo energético.

Las estructuras sándwich de material compuesto están formadas por dos láminas delgadas de material compuesto tipo laminado, denominadas pieles, entre las que se interpone un material ligero de mayor espesor y menores propiedades mecánicas, denominado núcleo. Mediante esta configuración, se produce un gran aumento de la rigidez a flexión sin que aumente el peso de manera significativa, por lo que las estructuras sándwich resultan muy útiles en aplicaciones donde se trabaje principalmente a flexión.

A continuación se muestra una comparación entre un laminado tradicional y estructura tipo sándwich (Tabla 1).

Tabla 1. Resistencia, rigidez y peso en función del espesor del núcleo.



Espesor núcleo	0	t	3t
Rigidez flexión	1	7	37
Resistencia	1	3,5	9,25
Peso	1	1,03	1,06

Muchas estructuras tipo sándwich pueden estar sometidas a impacto durante su vida en servicio, dependiendo del tipo de aplicación en las que se utilicen. Los daños causados por estas cargas impulsivas pueden variar las propiedades mecánicas de las estructuras, modificando su comportamiento. Los impactos suelen clasificarse en dos grandes grupos: impactos de baja velocidad y de alta velocidad.

Los impactos de baja velocidad, como por ejemplo la caída de una herramienta en operaciones de montaje, pueden originar daños que no se ven a simple vista. Por ello suelen ser los impactos más peligrosos. Los impactos de alta velocidad, como por ejemplo el choque entre un pájaro y un avión, pueden producir, además de la pérdida de propiedades mecánicas, la rotura total o parcial del componente.

Con el fin de conocer mejor el comportamiento de estructuras sándwich frente a cargas impulsivas, en el presente trabajo se estudia el comportamiento de dichas estructuras frente a impactos de baja velocidad. Para ello, se usará un modelo numérico desarrollado con un código de elementos finitos que facilitará el análisis del comportamiento de material frente a diversos casos, lo cual podría llegar a ser muy costoso de llevar a cabo experimentalmente.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado, es estudiar el comportamiento de placas tipo sándwich con pieles de material compuesto y núcleo de espuma cuando están sometidas a impactos de baja velocidad. Para ello se desarrollará un modelo numérico mediante el Método de los Elementos Finitos, utilizando el código comercial Abaqus/Explicit. Para poder alcanzar este objetivo principal, se presentan como objetivos secundarios los siguientes:

- Validar el modelo numérico con los resultados experimentales presentados por Anderson y Madenci en 2000 [1].
- Analizar los valores de fuerza máxima, así como de diferentes variables para un rango de energías de impacto (3.93 J – 23.31 J).
- Observar los cambios producidos en los resultados cuando se aplican diferentes condiciones de contorno sobre la estructura sándwich.
- Observar el comportamiento de la placa sándwich en función del ángulo de impacto proyectil-placa.

### 1.3.Contenido

Este Trabajo consta de seis capítulos, los cuales se detallan a continuación:

- **Capítulo 1:** Se describe el trabajo a realizar, los objetivos que se quieren conseguir y el contenido del mismo.
- **Capítulo 2:** Se describen los antecedentes y estudios llevados a cabo por otros autores en el campo a estudio del presente trabajo.
- **Capítulo 3:** Se presenta el desarrollo del modelo numérico mediante el código comercial Abaqus/Explicit.
- **Capítulo 4:** Se realiza la validación del modelo desarrollado, comparando los resultados experimentales con los datos obtenidos en la modelización. También se presentan los resultados más relevantes.
- **Capítulo 5:** Se muestran los resultados obtenidos a través del modelo aplicando diferentes condiciones de contorno y ángulos de impacto.
- **Capítulo 6:** Se presenta el presupuesto de realización del Trabajo.
- **Capítulo 7:** Se exponen las conclusiones del Trabajo y los posibles trabajos futuros a realizar.
- Por último se incluye la bibliografía utilizada durante la consecución del Trabajo.

## 2. ANTECEDENTES

---

## 2.1.Introducción a los materiales compuestos

Se entiende por material compuesto aquel formado por dos o más componentes de tal forma que las propiedades finales del material han de ser superiores que las que tienen los componentes por separado. En todos los materiales compuestos se distinguen dos elementos, la matriz que actúa como ligante, y el refuerzo que actúa como elemento resistente. Según Antonio Miravete [2] los materiales compuestos deben cumplir una serie de consideraciones:

- Un material compuesto debe de ser fabricado por la mano del hombre, quedando fuera de esta definición una gran cantidad de materiales naturales.
- Los materiales no deben tener continuidad fenomenológica quedando fuera materiales (por ejemplo, cerámicos).

Los materiales compuestos poseen mejores propiedades que los materiales que lo constituyen. A continuación se muestran las propiedades del ámbito ingenieril que resultan mejoradas gracias al uso de los materiales compuestos [3]:

- Resistencia mecánica.
- Rigidez
- Resistencia a la corrosión, a desgaste y a fatiga.
- Aislamiento térmico y acústico
- Ligereza

En la figura 1 se observa el módulo de elasticidad y densidad de diferentes materiales.

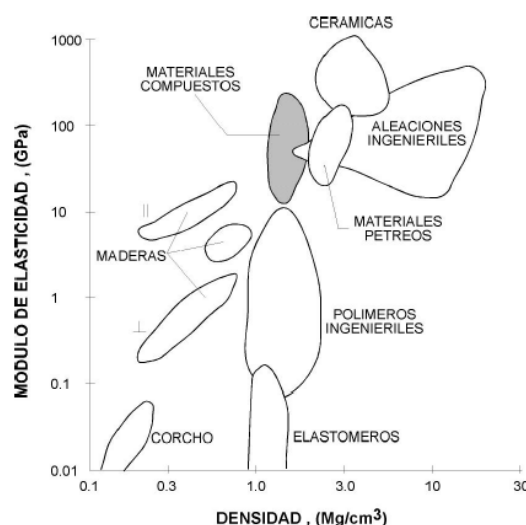


Fig. 1 Modulo de elasticidad y densidad de distintos materiales [3].

Como se observa en la figura 1, los materiales compuestos presentan una rigidez parecida a la de las aleaciones ingenieriles con menor densidad. Es por esa razón es que son tan utilizados en diferentes aplicaciones ingenieriles.

Para conocer el funcionamiento de los materiales compuestos tenemos que saber que es la matriz y que es el refuerzo, y la relación que existe entre ellos [4]. La matriz es la fase continua de la que se rodea el refuerzo, ésta se puede fabricar a partir de varios materiales: metálicos, cerámicos o resinas orgánicas. En general, el material que se elige para la matriz es menos rígido y resistente que el utilizado para el refuerzo.

La matriz ha de tener ciertas propiedades: debe ser capaz de mantener las fibras en su posición forma correcta, así como de transferir la carga a las fibras más fuertes. También deben proteger a las fibras de posibles daños durante su uso, y evitar la propagación de grietas en las mismas. La matriz de un material compuesto, por lo general, es responsable del control de propiedades térmicas y comportamiento químico. Existen diversos tipos de matrices como:

- Compuesto de matriz metálica (CMM): Como por ejemplo las aleaciones de aluminio, aleaciones de titanio, aleaciones de magnesio.
- Compuesto de matriz cerámica (CMC): Como la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) obtenida de la bauxita y el Carburo de Silicio ( $\text{SiC}$ ) obtenido de la arena y coque.
- Compuesto de matriz de polimérica (CMP, PMC): Entre los que se pueden distinguir polímeros termoestables, como el epoxi, y los polímeros termoplásticos, como el polipropileno.

El refuerzo es la fase discontinua que se une a la matriz para aportar propiedades tales como la resistencia mecánica, rigidez y dureza. El uso de refuerzos es para incrementar tanto resistencia como rigidez aunque también es utilizado para mejorar el comportamiento del material frente a altas temperaturas.

Las fibras más utilizadas como refuerzos en los materiales compuestos son:

- Fibras de vidrio: Presentan buena resistencia a tracción y frente a ataque químicos, además de ser duras y flexibles. Se elaboran a partir de sílice y se le añaden otros componentes dependiendo de las propiedades que se quieran conseguir.

- Fibras de carbono: Tienen alta resistencia y rigidez, debido a la estructura cristalográfica del grafito. Existen distintos tipos dependiendo del módulo de elasticidad y resistencia que tengan.
- Fibras cerámicas: Son flexibles y presentan poco alargamiento y resistencia térmica. Están hechas de cuarzo o sílice.
- Fibras metálicas: Más densas que las anteriores y de alto coste, suelen ser de aluminio, acero o titanio.
- Fibra de Boro.

Los materiales compuestos más utilizados son los CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastics*), que son materiales compuestos reforzados con fibra de carbono en matriz orgánica, y los GFRP (*Glass Fiber Reinforced Plastics*), que son materiales compuestos reforzados por fibra de vidrio en matriz orgánica.

## 2.2. Introducción a las estructuras tipo sándwich

Las estructuras tipo sándwich están constituida por dos láminas finas de altas propiedades mecánicas denominadas pieles, y una placa de mayor espesor de material de baja densidad denominado núcleo. En la figura 2 se muestra un esquema de la composición de una estructura sándwich.

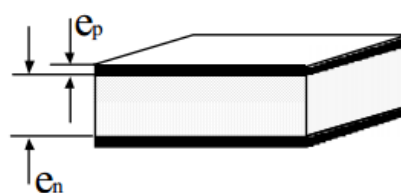



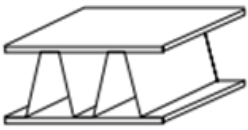
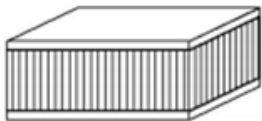
Fig. 2 Estructura sándwich.

Las pieles pueden ser de diversos materiales, tanto metálicos (por ejemplo, aleación de aluminio) como no metálicos (laminados de material compuesto). Estos últimos son los más utilizados por sus buenas propiedades mecánicas. El núcleo ha de ser de un material de baja densidad, alta resistencia y rigidez a cortadura, y dependiendo del material podrá tener un buen aislamiento. Los más utilizados son los núcleos de espuma y de nido de abeja.

En un panel sándwich sometido a flexión, las pieles exteriores estarán sometidas a esfuerzos distintos. Por ejemplo, si la inferior está sometida a tracción la superior estará sometida a compresión. Ambas deben de ser capaces de resistir estos esfuerzos. El núcleo debe soportar los esfuerzos a compresión y de cortadura que puedan producirse, de esta manera se evitara que las pieles se desplacen.

En la tabla 2 se muestra los núcleos y pieles más utilizados en la fabricación de estructuras tipo sándwich:

**Tabla 2 Tipos de pieles y nucleos.**

	<b>Pieles</b>	<b>Núcleos</b>
<b>Expandido</b> 	Metales Laminados Contrachapados termoplásticos	Espuma de poliuretano Espuma de poliestileno
<b>Placa nervada</b> 	Amianto/Cemento Metales Laminados	Metal Material compuesto
<b>Nido de abeja</b> 	Contrachapados Laminados Aluminio	Madera Nido de abeja de cartón Nido de abeja de aluminio

### 2.2.1. Tipos de pieles

Las pieles de una estructura sándwich han de ser placas de pequeño espesor y pueden ser de distintos materiales, tanto metálicos como no metálicos. Las pieles inferior y superior suelen ser iguales, pero en ocasiones pueden ser distintas dependiendo del tipo de esfuerzo o a las condiciones ambientales a las que va a ser sometida la estructura.



La elección del tipo de piel vendrá determinada por la aplicación final de la estructura, siendo las pieles de material compuesto tipo laminado las más utilizadas, gracias a sus buenas propiedades mecánicas y a su alta compatibilidad con diferentes núcleos.

Los laminados de material compuesto se obtienen mediante la unión de láminas finas, entre las que se pueden distinguir varios tipos [5]. Estos materiales normalmente están constituidos por matriz polimérica (epoxi, poliéster, etc.) y fibras de vidrio, carbono, aramida, etc. Los tipos de láminas que se pueden encontrar son:

- Lámina unidireccional: Donde todas las fibras están orientadas en la misma dirección. En este tipo se considera isotropía transversal, es decir, los planos perpendiculares a las fibras tienen las mismas propiedades.
- Láminas de tejido: Las fibras están orientadas en direcciones perpendiculares entre ellas y se encuentran entrelazadas. A las fibras se les denominan urdimbre (longitudinales) y trama (transversales). Este tipo de lámina se considera ortótropa.
- Láminas tipo MAT: Compuesta por fibras orientadas de forma aleatoria, se consideran las mismas propiedades en todas las direcciones.

### 2.2.2. Tipos de Núcleos

Existen diversos tipos de núcleo que se pueden utilizar en las estructuras sándwich, como son las maderas naturales, la madera de balsa, el cedro rojo o el contrachapado marino; también existen espumas sintéticas, por ejemplo, de policloruro de vinilo (PVC), poliuretano, poliestireno (PS), estireno-acrilonitrilo (SAN), polimetacrilimida (PMI) o espumas metálicas. Otro tipo son los nudos corrugados; por último los núcleos de nido de abeja (Honeycomb).

Entre estos últimos los más utilizados son:

#### **Nido de abeja**

El nombre de este núcleo viene de la estructura formada por celdillas hexagonales que crean las abejas dentro de una colmena. Se realizan a partir de láminas delgadas, tanto de materiales metálicos como no metálicos. Esto, junto al espesor de las láminas, hace que se puedan variar las propiedades del núcleo que se deseen y así lograr gran variedad de propiedades mecánicas. En la figura 3 se puede ver un ejemplo de un núcleo nido de abeja.

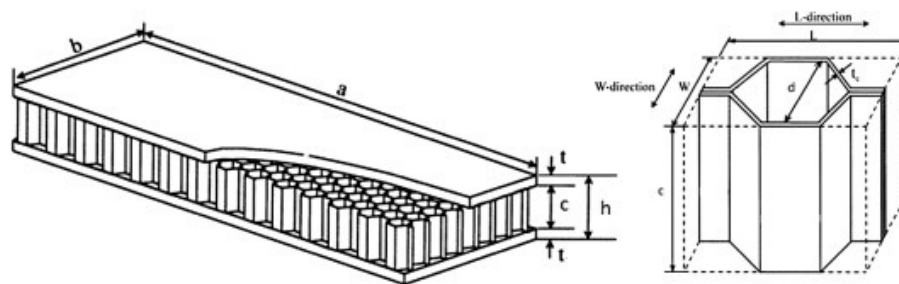


Fig. 3 Dimensiones nucleo panel abeja[6]

Los paneles se unen mediante adhesivo o mediante soldadura, dejando así celdas regulares y repetitivas. Los paneles no solo son hexagonales, pueden tener gran variedad de formas como cuadrados, triángulos, etc.

La morfología de este núcleo [7] se define teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Tamaño de celdilla: Se suele determinar por el diámetro de círculo que pueda inscribirse en la misma, normalmente varía entre 1,6 y 1,9mm.
- Nodo: Zona de adhesión o pegado entre celdillas contiguas
- Altura de núcleo: Distancia entre las caras externas del núcleo.
- Espesor de la hoja
- Dirección longitudinal: Es la dirección paralela a las líneas de nodos o al plano de apilamiento de las láminas.
- Dirección transversal: Es la dirección de expansión del núcleo. Es perpendicular a la dirección longitudinal.
- Densidad: Parámetro que depende del material, espesor y tamaño de la hoja.

Yi-Ming Jen et al. estudiaron el comportamiento de los núcleos de nido de abeja [8]. En dicho estudio se realizan ensayos de fatiga sobre estructuras compuestas por láminas de diferente espesor y núcleo "*Honeycomb*", concluyendo que el principal fallo por fatiga observado en los paneles sándwich es la pérdida de adherencia entre piel y núcleo, debido a esfuerzos de cortadura.

## Espumas

Los núcleos de espuma se forman mediante la composición de burbujas. Esto se consigue mediante grandes volúmenes de gas y pequeños volúmenes de líquidos que forman burbujas las cuales crecen quedando unas cerca de las otras. Se tiene una gran variedad de

espumas a utilizar dependiendo de las propiedades que se busquen, como Polimetacrilamida, PVC, Poliestileno. Las propiedades vienen dadas por varios parámetros: Composición del polímero, cristalinidad, densidad de la espuma, estructura de las celdillas y composición del gas espumante.

Las espumas son muy utilizadas debido a su bajo coste, aunque su resistencia a cortadura sea menor que la de otros núcleos.

Las propiedades de las espumas dependen de [7]:

- Composición del polímero
- Estado del polímero (orientación, cristalinidad, historia térmica)
- Densidad de la espuma
- Estructura de las celdillas (tamaño, geométrica, fracción de las células abiertas)
- Composición del gas espumante

Este tipo de materiales tienen propiedades importantes como la resistencia al fuego. La estructura celular permite la combustión de la espuma progrese de manera rápida, por ello se suelen incorporar distintos aditivos como el bromo, cloro y fosforo.

Se han realizado diversos estudios para analizar el comportamiento de las espumas dependiendo de las condiciones ambientales a las que estén expuestas [9], donde describen cómo se comportan espumas de PVC frente a la humedad. Tras los ensayos experimentales se observaron grietas y picadura. Con exámenes ópticos también se reveló que la humedad absorbida solo penetra unos 3 mm para un 95% de humedad, mientras que lo hace más profundamente si el núcleo está sumergido en agua salada.

En otro estudio [10] se analiza el comportamiento de una estructura sándwich con núcleo de espuma y pieles de fibra de carbono en matriz epoxi. El núcleo tiene tres capas de diferentes espumas con distintas densidades, colocadas una sobre otra. Se demostró que estas estructuras pueden superar el rendimiento en cuanto a resistencia a perforación, pero para ello se ha de colocar la espuma de alta densidad en contacto con la superficie superior de la estructura sándwich y el núcleo de baja densidad en medio.

También existen experimentos donde se observa la respuesta a la velocidad de deformación y a la temperatura [11].

## 2.3. Aplicaciones de estructuras tipo sándwich

El uso de las estructuras tipo sándwich ha crecido de manera muy rápida debido a sus propiedades. La búsqueda de materiales más ligeros y con unas buenas propiedades hace que este tipo de estructuras se utilice en distintas áreas como la industria aeronáutica, la industria automovilística, la industria naval, etc. En las siguientes imágenes (Fig.4) se puede ver varias aplicaciones donde se usan estructuras tipo sándwich.

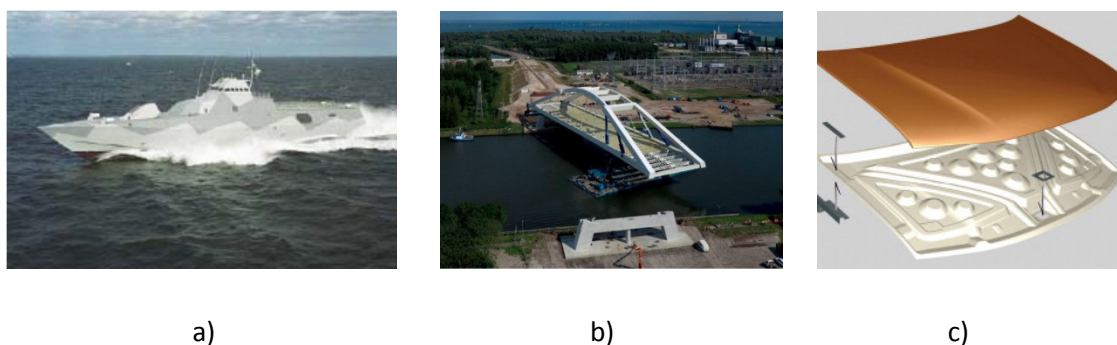


Fig. 4 Aplicaciones estructura sandwich; a) Casco corbeta Visby [15]; b) Puente de Uyllander (Amsterdam)[14]; c) Automovil[13].

Los materiales compuestos se llevan utilizando décadas en la industria naval, las características de los paneles tipo sándwich han hecho que este material sea especialmente válido para muchas aplicaciones en este sector, principalmente ya que se busca aligerar el peso.

También se han realizado investigaciones en vehículos subacuáticos [12] donde se simulan como si fueran un cilindro ya que es la forma de la mayoría de estos vehículos, y debido a una presión externa sobre los paneles se quiere observar las consecuencias.

Se utilizan los materiales compuestos en distintas partes de automóviles como el capó el techo etc. [13]. Las estructuras tipo sándwich tienen entre una de sus principales ventajas la reducción de peso por la densidad del núcleo, esto hace que se reduzcan las emisiones de contaminantes a la atmosfera.

Dependiendo de la zona en la que se vaya a utilizar, los tipos de materiales utilizados en los núcleos variarán, ya que las propiedades deseadas entre diferentes zonas serán distintas, por ejemplo: en ciertas zonas se deseara que la resistencia al impacto sea mayor y

que tenga una buena absorción de energía, mientras que en otras lo que se busca es que sea aislante térmico.

En la aviación los primeros aviones fueron de madera pero debido a los cambios de tamaños y propiedades de ésta se dejaron de utilizar, aunque sus propiedades de módulo elástico y resistencia son altas en comparación con su densidad.

Posteriormente se empezaron a utilizar metales como el acero, el cual tiene una buena resistencia pero una densidad muy elevada, el titanio que se usa cuando se tienen que soportar temperaturas muy elevadas, y el aluminio es el metal más utilizado en la aviación, ya que tiene unas propiedades medias con una adecuada resistencia y baja densidad, aunque tiene un uso limitado debido al deterioro que sufre al ser expuesto a diferentes temperaturas.

En la actualidad las más utilizadas son los materiales compuestos y las estructuras tipo sándwich debido a sus propiedades de alta resistencia y bajo peso, aunque a cierto tipo de impactos pueden recibir daños difíciles de encontrar. En la figura 5 se puede ver un avión Airbus A380 donde está detallado dónde se utilizan las estructuras tipo sándwich de núcleo de panel de abeja.

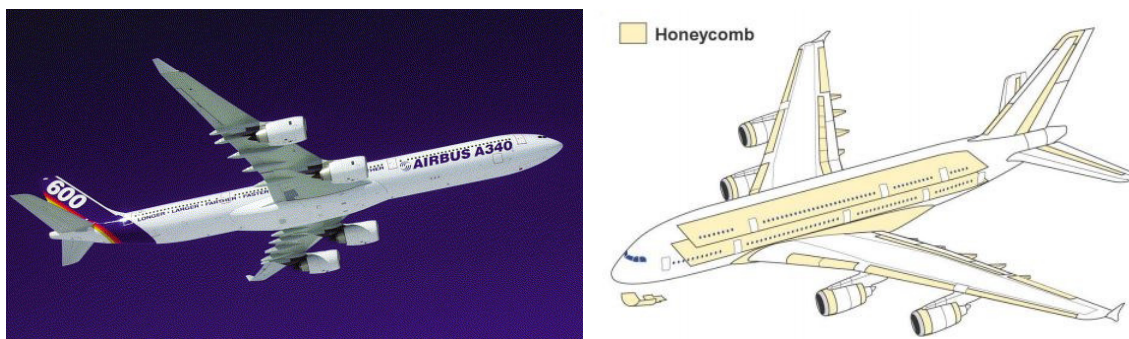


Fig. 5 Airbus A380 con espuma PMI y Honeycomb en distintas zonas del avión.

Las estructuras de materiales tipo sándwich pueden proporcionar soluciones tanto en peso como en costes. Por ello también se ha producido un aumento del uso de estos materiales en la construcción. Se han utilizado tanto en edificios como en gran cantidad de puentes, como el Puente de Uyllander [14].

## 2.4. Impactos en estructuras tipo sándwich

Los materiales compuestos pueden recibir impactos localizados según su aplicación. Los daños generados por éstos pueden ser difíciles de detectar y producir una reducción de sus propiedades mecánicas, por este motivo se hacen diversos análisis con el fin de prevenir los daños.

Existen varios tipos de estudios para prevenir estos daños. El más sencillo y básico sería realizar un ensayo experimental, éste se podría realizar con los aparatos y materiales necesarios. La máquina de ensayos más utilizada para este tipo de ensayos de impacto es la torre de caída, con la que se puede definir las condiciones y la energía de impacto, además de medir diversos parámetros con células de medida para obtener resultados. Este método es costoso, ya que cada vez que la estructura estuviese dañada se tendría que cambiar por materiales nuevos, pero daría unos resultados más representativos a la realidad.

Otra manera es mediante un método analítico. Esto se basa en abordar el problema planteado de forma matemática, e intentar reproducir el proceso mediante simplificaciones. Este estudio suele necesitar de ensayos experimentales para comprobar si no existe demasiado error entre ellos.

Existen diversas técnicas para realizar simulaciones numéricas, como diferencias finitas, elementos de contorno o elementos finitos. La técnica más utilizada es la de elementos finitos donde cualquier tipo de geometría, aplicación de carga o condiciones de contorno se puede abordar. Este método también se ha de comparar con ensayos experimentales para comprobar si no difiere demasiado con la realidad, pero el modelo numérico se le puede realizar diferentes modificaciones del modelo inicial sin que sea tan costoso.

Por ello se han realizado diversos estudios con el fin de caracterizar los daños producidos sobre los materiales compuestos. Por ejemplo, el artículo en el que se basa este trabajo, consiste en unos ensayos experimentales de impactos a baja velocidad sobre distintos materiales tipo sándwich [1], en el estudio se explica lo que ocurre con el aumento de energía y las consecuencias tanto de deformación, como daños estructurales.

En la vida de los materiales sándwich las estructuras reciben impactos de diferentes tipos de proyectiles, tanto de diferentes materiales como de diferentes geometrías, por ello varios investigadores [16] estudian lo que ocurriría al impactar un proyectil con varias geometrías. En este estudio se comprobó que la forma del proyectil y el núcleo de la espuma

tienen gran influencia en la indentación de los paneles sándwich, donde se observó que para proyectiles con cara plana el área dañada era mayor que para los cónicos, además que el diámetro de un proyectil esférico no tenía demasiada influencia en la rigidez de los paneles.

### 2.4.1. Impactos a alta y baja velocidad.

Los impactos se clasifican generalmente entre impactos de alta velocidad e impactos de baja velocidad.

#### ***Impactos de baja velocidad***

Si el impacto es de baja velocidad, simula el impacto que realizaría un objeto con baja velocidad sobre la estructura. Estos impactos son peligrosos en materiales compuestos ya que el daño puede ser invisible a la inspección visual. El método experimental más utilizado para este tipo de impactos es la torre de caída, el cual simularía por ejemplo la caída de una herramienta sobre la estructura cuando se realizan tareas de mantenimiento.

En los impactos a baja velocidad las ondas de tensión generadas alcanzan los bordes de la estructura, por lo que la respuesta de la estructura es global y depende de las condiciones de contorno y geometría de esta [17].

Sobre este tipo de impactos se han realizado diversas investigaciones tanto experimentales como numéricas. Jie Wanget al. en 2013 [18] realizaron ensayos de impacto a baja velocidad en materiales tipo sándwich con núcleo de espuma y pieles de fibra de carbono. En el modelo se realizaron varias modificaciones para estudiar como afectaban a los resultados. Se modificó el tamaño del proyectil, la energía de impacto y el grosor del núcleo. Tras estos estudios se llegó a unas ciertas conclusiones:

- El impacto de baja velocidad puede causar los siguientes daños: muescas permanentes de forma semiesférica bajo la zona impactada, aplastamiento de la matriz debido a compresión, núcleo de espuma aplastado y deformación residual en todo el panel. No suele existir delaminación.
- Los parámetros de impacto como la carga pico, la relación de energía/ energía de impacto y duración de contacto aumentó con la energía de impacto absorbida; la relación de energía absorbida/energía de impacto, duración del contacto disminuyó con el tamaño del proyectil, mientras que el pico de carga aumento; la relación de

energía absorbida/energía de impacto y duración del contacto disminuyeron con el espesor de las pieles.

- En daños planos, diámetro y profundidad de penetración aumentan con energía de impacto, mientras que disminuye el espesor de las caras.
- La respuesta al impacto y estado de daños es independiente del espesor del núcleo de espuma.
- La flexión residual en el panel debido al espesor, forma cizallamiento durante el impacto.

El trabajo de Jin Zhou et al. [19] estudia los resultados experimentales y numéricos de la resistencia de perforación de las estructuras sándwich, caracterizada por la energía necesaria para perforar los paneles. Se llegaron a varias conclusiones, como que el aumento de la densidad tenía un aumento de la resistencia a perforación. También se estudió mediante elementos finitos el efecto del impacto oblicuo y de los impactos en medios acuosos, donde se concluyó que a mayor ángulo de impacto mayor ha de ser la energía necesaria para perforar y en medios acuosos la resistencia a perforación es menor.

En 2013, F.J. Yanga y M.Z. Hassan [20] estudiaron el efecto del tamaño de las placas sándwich, observando los daños que se producen en cada una y la fuerza de contacto. En este estudio se obtuvieron varias conclusiones, como que los principales mecanismos de absorción de energía son la fractura de la fibra en las pieles y el aplastamiento del núcleo. En cuanto a la energía absorbida y daño global de la estructura no se observaron demasiadas diferencias, pero si se observaron diferencias en las muescas que dejó el impacto.

### ***Impactos de alta velocidad***

Si el impacto es de alta velocidad se pretende simular el impacto de una masa en una estructura. En estos impactos el fallo se encuentra cercano a la zona de impacto, esto es debido a que las ondas de tensión se propagan en dirección perpendicular al laminado, por ello la respuesta frente a este tipo de impacto será por las propiedades de la estructura en la zona del impacto y no por las condiciones de contorno o el tamaño de ésta [17].

Diversos estudios analizan el comportamiento de los impactos a alta velocidad y las consecuencias y fallos que tendrán estos [21,22]. Estos estudios se realizan a partir de una estructura sándwich con núcleo de espuma, donde se quiere reproducir mediante Abaqus un proceso experimental y así poder llegar a una simulación. En este estudio se llegan a varias conclusiones, como que cuanto mayor es la velocidad del impacto mayor es la energía



absorbida por las caras por lo que la influencia del núcleo es menor. El fallo de las fibras es el principal mecanismo de fallo en estas estructuras y es el responsable de los daños en las láminas de las caras. También se observa que en la cara frontal el área dañada se incrementa con la eliminación del núcleo de espuma, mientras que en la cara inferior la zona dañada era más grande en el modelo de sándwich que en las placas separadas por que la velocidad era menor.

Otros estudios también ven la influencia de la densidad de la espuma con un impacto a alta velocidad [23], siendo el espesor del núcleo vital a la hora de absorber la energía. También que una densidad demasiado grande la convertiría en frágil ya que dejaría de absorber energía, demostrándose que el mejor rendimiento para que no ocurriese esto sería con una densidad inferior a  $70 \text{ kg/m}^3$ .

#### 2.4.2. Impacto oblicuo

Debido a la gran cantidad de usos que tienen las estructuras tipo sándwich tiene relevancia el estudio de los impactos que se realicen con un ángulo diferente al perpendicular de una placa. En estos análisis se suele observar el área dañada, la energía absorbida el límite balístico, etc.

En 2012, M.A. Iqbala et al. [24] estudiaron la influencia del ángulo de impacto y la forma del el proyectil utilizado sobre placas sándwich. Se llegó a la conclusión que aumentaba el límite balístico con el aumento del ángulo, y aumentaba cuanto menor fuese en ángulo de la punta del proyectil.

En estructuras sándwich, como por ejemplo en el ala de un avión pueden producirse distintos tipos de impacto, por lo que tiene gran importancia el estudio de estos impactos y sus repercusiones. En el estudio de 2012 de Navarro et al. [25] se observa la dependencia del ángulo que forma el eje de impacto y la orientación de las fibras observándose una gran dependencia entre ellos cuando sufre rotura. En la figura 6 se puede observar un ejemplo de cómo se producen impactos oblicuos y normales.

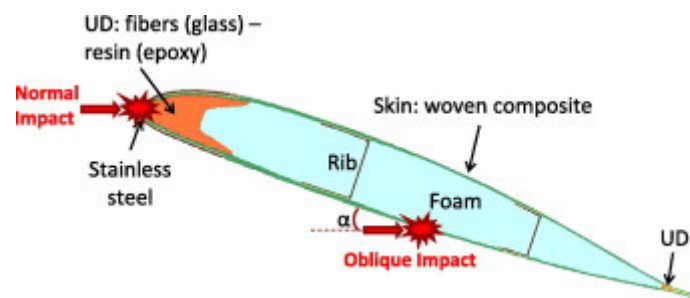


Fig. 6 Impacto oblicuo [25]

En 2008 los investigadores D.W. Zhou y W.J. Stronge estudiaron la dependencia del ángulo de impacto con el límite balístico. Este límite es la velocidad máxima para que el proyectil no penetre completamente en la placa, y se observó cómo variaba para diferentes ángulos de impacto [26].

En 2014, J. Pernas-Sánchez et al. [27] estudiaron el efecto de impactos a alta velocidad sobre laminados isotropos de carbono/epoxi. Se utilizaron dos ángulos de impacto y una amplia gama de velocidades, observando resultados como el área dañada y energía absorbida por la placa.

## 2.5. Criterios de rotura

Para la modelización los materiales compuestos se deben tener en cuenta los daños que pueden sufrir y para ello se debe implementar un modelo de fallo. Existen varios tipos de criterios de fallo como el de Tsa-Hill (1968), Tsai-Wu (1971), Hoffman (1967), Hashin-Rotem (1973), Hashin (1980), Yamada-Sun (1978), Hou (2000). A continuación se explica en más detalle los dos criterios de Hashin existentes ya que en el código Abaqus se puede definir este criterio y será el que se utilice en el modelo. [28]

### 2.5.1. Criterio de Hashin-Rotem

Es un criterio de fallo para laminados con fibras unidireccionales y en tensión plana. Este criterio es válido para fallos a fatiga y se puede ampliar a fallos estáticos. En este criterio

se consideran dos tipos de fallo tanto en la matriz como en las fibras. En estos se tratará de forma distinta según si trabaja a compresión o a tracción la fibra o la matriz.

- Fallo de la fibra a tracción ( $\sigma_{11} > 0$ ):

$$\sigma_{11} = X_T \quad \text{Ec. 2.1}$$

- Fallo de la fibra a compresión ( $\sigma_{11} < 0$ ):

$$-\sigma_{11} = X_C \quad \text{Ec. 2.2}$$

- Fallo de la matriz a tracción ( $\sigma_{22} > 0$ ):

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad \text{Ec. 2.3}$$

- Fallo de la matriz a compresión ( $\sigma_{22} < 0$ ):

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad \text{Ec. 2.4}$$

Dónde:

$X_t$ : Resistencia mecánica a tracción en la dirección longitudinal de las fibras.

$X_c$ : Resistencia mecánica a compresión en la dirección longitudinal de las fibras.

$Y_t$ : Resistencia mecánica a tracción en la dirección transversal de las fibras.

$Y_c$ : Resistencia mecánica a compresión en la dirección longitudinal de las fibras.

$S$ : Resistencia a cortadura entre laminas en dirección longitudinal de las fibras.

$\sigma_{11}$ : Tensión nominal en la lámina en la dirección de las fibras.

$\sigma_{22}$ : Tensión nominal en la lámina en la dirección transversal de las fibras.

$\sigma_{12}$ : Tensión de cortadura en el plano de las láminas.

Dado que el criterio solo trata láminas unidireccionales no considera la interacción entre láminas ni el efecto de la de laminación.

### 2.5.2. Criterio de Hashin

El criterio de Hashin de 1980 considera tensiones tridimensionales. Este criterio quiere que se distinga entre estados de tracción y compresión tanto para rotura de fibra como para la rotura de la matriz. Una de las principales diferencias que existen en este criterio respecto al anterior es que se incluye el efecto de la tensión de cortadura en la rotura a tensión de la fibra.

Hashin desarrolla expresiones tanto para el caso de tensiones en el espacio (3D) como para el de tensiones planas (2D).

Criterio de fallo para tensiones en el espacio.

- Fallo de la fibra a tracción ( $\sigma_{11} > 0$ ):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S^2}\right) = 1 \quad \text{ó} \quad \sigma_{11} = X_T \quad \text{Ec. 2.5}$$

- Fallo de la fibra a compresión ( $\sigma_{11} < 0$ ):

$$-\sigma_{11} = X_C \quad \text{Ec. 2.6}$$

- Fallo de la matriz a tracción ( $\sigma_{22} + \sigma_{33} > 0$ ):

$$\left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S^2}\right) + \left(\frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22} \cdot \sigma_{33}}{S_T^2}\right) = 1 \quad \text{Ec. 2.7}$$

- Fallo de la matriz a compresión ( $\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$ ):

$$\frac{1}{Y_C} \left[ \left( \frac{Y_C}{2S_T} \right) - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \left( \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_T^2} \right) + \left( \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{22} \sigma_{33}}{S_T^2} \right) + \left( \frac{\sigma_{13}^2}{S^2} \right) = 1 \quad \text{Ec. 2.8}$$

Dónde:

$S_T$ : Resistencia de cortadura entre laminas en dirección trasversal a las fibras (máximo valor de  $\sigma_{23}$ ).

$\sigma_{13}$ : Tensión nominal de cortadura en el plano formado por las direcciones 1 y 3.

$\sigma_{23}$ : Tensión nominal de cortadura en el plano formado por las direcciones 2 y 3.

$\sigma_{33}$ : Tensión nominal de la lámina en dirección perpendicular al laminado.

Criterio de fallo para tensiones planas.

- Fallo de la fibra a tracción ( $\sigma_{11} > 0$ ):

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad \text{Ec. 2.9}$$

- Fallo de la fibra a compresión ( $\sigma_{11} < 0$ ):

$$-\sigma_{11} = X_C \quad \text{Ec. 2.10}$$

- Fallo de la matriz a tracción ( $\sigma_{22} + \sigma_{33} > 0$ ):

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad \text{Ec. 2.11}$$

- Fallo de la matriz a compresión ( $\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$ ):

$$\frac{(\sigma_{22})}{Y_C} \left[ \left(\frac{Y_C}{2S_T}\right)^2 - 1 \right] + \left(\frac{\sigma_{22}}{2S_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad \text{Ec. 2.12}$$

### 3. MODELIZACIÓN NUMÉRICA

---

### 3.1.Introducción a la modelización

En este capítulo se explica detalladamente el proceso de desarrollo del modelo numérico realizado, el cual desarrolla un modelo numérico que es capaz de simular un impacto a baja velocidad sobre una estructura sándwich mediante el código comercial de elementos finitos Abaqus.

El ajuste de un modelo de elementos finitos puede llegar a ser muy complicado debido a la cantidad de parámetros que pueden afectar a la respuesta de una estructura, pero cuanto mayor sea la aproximación del modelo a la realidad, más exacto será el resultado. Para la validación del modelo desarrollado se utilizarán los resultados experimentales obtenidos por Anderson y Madenci en el año 2000 [1], donde se realizan varios impactos en distintos tipos de placas sándwich.

A continuación se exponen las ventajas de la utilización de modelos numéricos:

- La posibilidad de realizar numerosos ensayos simultáneos gracias a la rapidez del método.
- Ahorro tanto de recursos materiales como humanos, ya que permite simular casos cercanos al comportamiento real, con un coste bajo.
- Resolución de problemas que serían complejos de solucionar de forma analítica. La simulación puede ser muy práctica en problemas de impacto.

Por contraposición para que sea exacta la simulación se deba considerar un gran número de parámetros, lo que puede dificultar la obtención del diseño deseado.

### 3.2.Modelización del impacto

Para el desarrollo del presente Trabajo, se utilizan tres tipos de placas sándwich con diferentes configuraciones. Se dispone de dos tipos de pieles del mismo material pero distintas secuencias de apilamiento, una de ellas consta de tres láminas mientras que la otra está formada por seis láminas. A su vez, se dispone de dos tipos de núcleo en función de su densidad: espuma de PMI (Polimetacrilimida) de baja densidad ( $51 \text{ kg/m}^3$ ) y de alta densidad ( $110 \text{ kg/m}^3$ ). Las tres configuraciones utilizadas se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 Tipos de estructura sándwich de diferentes espumas y pieles.

Tipo estructura	Espuma	Laminas
Tipo I	Baja densidad	3 laminas
Tipo II	Alta densidad	3 laminas
Tipo III	Alta densidad	6 laminas

El modelo numérico desarrollado se validará para los tres tipos de configuración que se muestran en la tabla 3, centrándose finalmente el resto de estudios realizados en el presente Trabajo en el modelo Tipo I.

### 3.2.1. Modelización geométrica

#### Proyectil

El proyectil simulará el aparato percutor descrito por D.R. Ambur en 1993 [29]. El sistema se basa en dejar caer desde cierta altura un percutor con una determinada masa, mientras se mide la carga en función del tiempo. La estructura de la torre de caída sería la mostrada en la figura 7.

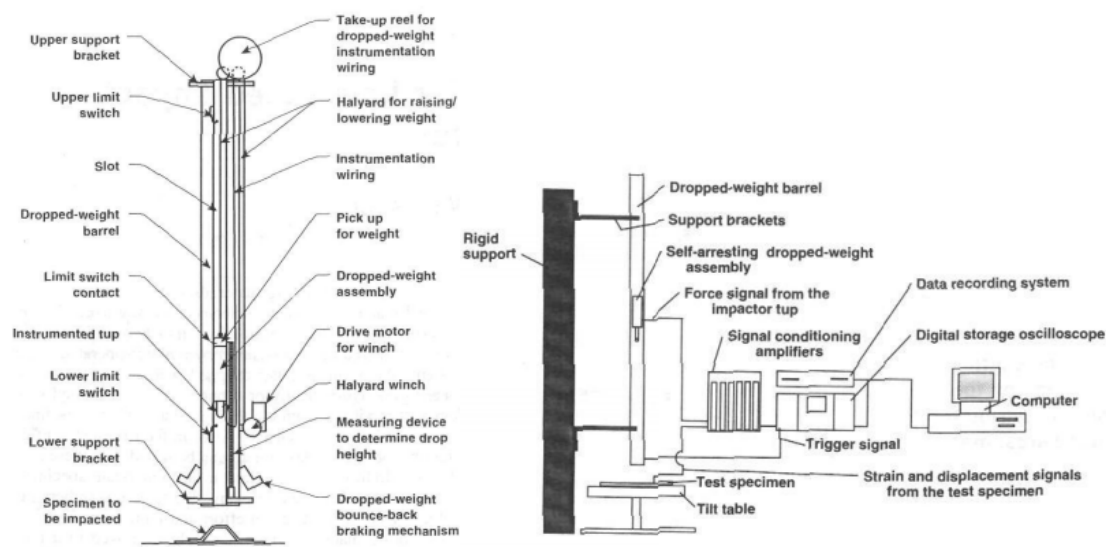


Fig. 7 Máquina de ensayo utilizada en los ensayos experimentales [29]

Por simplificar, el conjunto percutor se modeliza como un proyectil esférico con el mismo diámetro de punta y masa que las del conjunto percutor utilizado para los resultados experimentales. El proyectil se muestra en la figura 8.



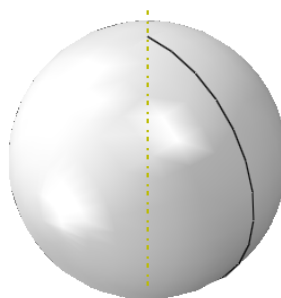


Fig. 8 Modelo proyectil.

### **Apoyos**

Los apoyos hechos de acero y de comportamiento elástico-lineal se muestran en la figura 9, de 10mm de ancho y 15mm de alto con un radio de acuerdo de 5mmn. Su longitud será la misma que la de la placa.

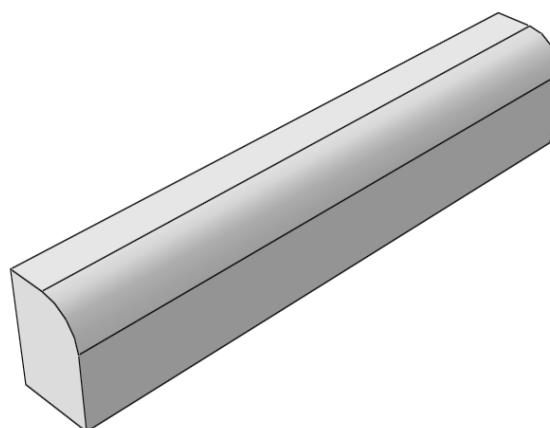


Fig. 9 Modelo Apoyo.

### **Estructura sándwich**

Para la modelización de la placa se debe modelar tanto las pieles como el núcleo

#### **Núcleo**

El núcleo (Fig. 10) se realizó con elementos sólidos por extrusión y deformables, con un ancho y un largo de  $76,2 \times 76,2 \text{ mm}^2$  y un espesor de 12,7mm.

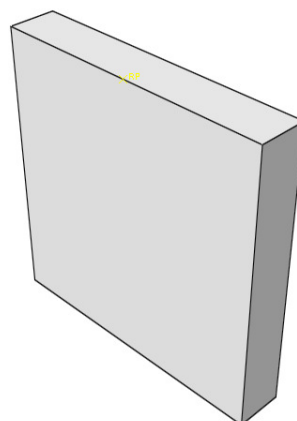


Fig. 10 Modelo núcleo

### Pieles

Las pieles (Fig. 11) se modelizan con elementos tipo *Shell* con el mismo ancho y largo que la placa, y variando el espesor de las mismas en función de la configuración de pieles utilizadas. Como ya se explicó, se dispone de dos tipos de configuraciones para las pieles: una primera configuración con secuencia de apilamiento  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$  y una segunda con secuencia de apilamiento  $[0_2^\circ/90_2^\circ/0_2^\circ]$ , siendo el espesor de cada lámina de 0,264 mm.

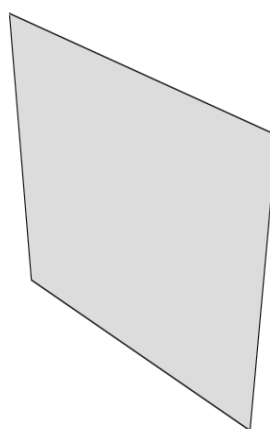


Fig. 11 Modelo pieles

### 3.2.2. Materiales

#### **Proyectil**

El proyectil tiene forma esférica y el material del que está compuesto es acero. Se supondrá que tiene un comportamiento elástico-lineal. La masa está comprendida entre 1,8 kg y 2,7 kg. El diámetro del proyectil es el mismo que el utilizado experimentalmente (25,4 mm).

Como tras el impacto no se ha observado deformación alguna en el proyectil, se toman las siguientes propiedades para definir el comportamiento elástico lineal (tabla 4):

Tabla 4. Propiedades del acero del proyectil

	Módulo de Young [Pa]	Coefficiente de Poisson [ ]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
Acero	$210 \cdot 10^9$	0,3	7850

### Apoyos

El modelo constará de dos apoyos, los cuales, al igual que el proyectil, no sufrirán deformación alguna tras el impacto. El material utilizado es de nuevo el acero suponiéndose un comportamiento elástico-lineal. Las propiedades para definir el acero son las mismas que para el proyectil que se muestran en la tabla 4.

### Estructura sándwich

La estructura sándwich se dividirá en dos partes: pieles de material compuesto reforzado por fibra de carbono, y núcleo de espuma de Polimetacrilimida.

### Pieles

Las pieles están constituidas por material compuesto de fibra de carbono y matriz epoxi (LTM45EL/CF0111), las cuales están compuestas por tres láminas cuadradas de  $76,2 \times 76,2 \text{ mm}^2$ . La orientación de las láminas es  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$  tal y como se muestra en la figura 12.

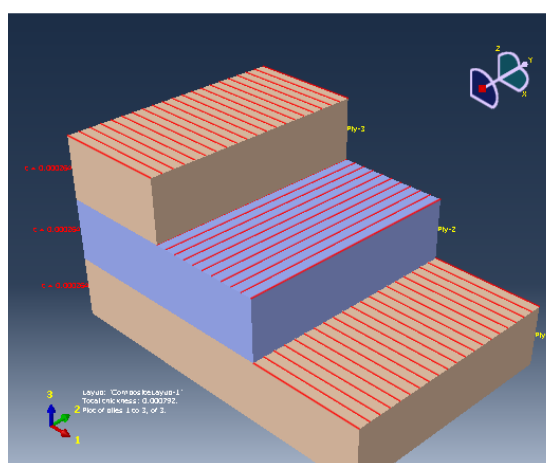


Fig. 12 Orientación de las pieles de laminado  $0^\circ/90^\circ/0^\circ$

La segunda configuración de las pieles constará de seis láminas y estará orientadas según la secuencia  $[0_2^\circ/90_2^\circ/0_2^\circ]$  tal y como se muestra en la figura 13:

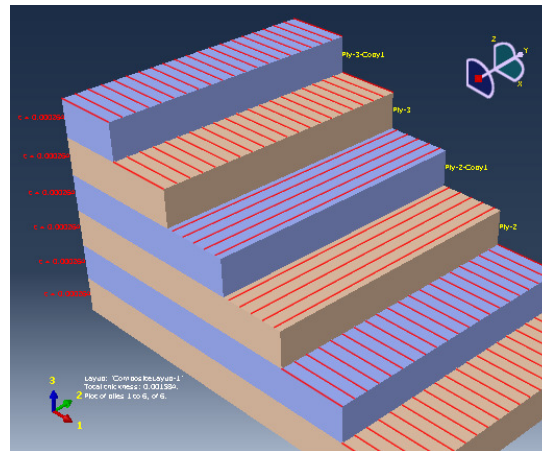


Fig. 13 Orientación de las pieles de laminado  $0_2^\circ/90_2^\circ/0_2^\circ$ .

En la tabla 5 se muestran tanto las propiedades mecánicas del material compuesto, así como las medidas de la placa:

Tabla 5 Propiedades de las pieles LTM45EL/CF0111

Propiedades	Pieles
$E_{11}$ [GPa]	54
$E_{22}$ [GPa]	54
$E_{33}$ [GPa]	4,84
$G_{12}$ [GPa]	3,16
$G_{13}$ [GPa]	1,87
$G_{23}$ [GPa]	1,87
$\nu_{12}$ [ ]	0,06
$\nu_{13}$ [ ]	0,313
$\nu_{23}$ [ ]	0,313
$P$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1511
$t$ [mm]	0,265
$a$ [mm]	76,2
$B$ [mm]	76,2

Con el criterio de daño de Hashin, el cual está definido en el programa Abaqus, se puede implementar un criterio de daño para las pieles. Se debe incluir la resistencia de rotura del material compuesto, tanto a tracción como a compresión y cortadura. Las propiedades están definidas por un material compuesto de similares propiedades [30] que se muestran en la tabla 6:

Tabla 6 Resistencia de las pieles.

LTM45EL/CF0111	
Resistencia longitudinal a tracción[MPa]	611
Resistencia transversal a tracción[MPa]	611
Resistencia longitudinal a compresión[MPa]	608
Resistencia transversal a compresión[MPa]	608
Resistencia longitudinal a cortadura[MPa]	55
Resistencia transversal a cortadura[MPa]	55

### Núcleo

El núcleo está compuesto por la espuma Rohacell de Polimetacrilimida (PMI), siendo la espuma de menor densidad denominada como 51WF (51 kg/m<sup>3</sup>) y la de alta densidad como 110WF (110 kg/m<sup>3</sup>).

Para definir las propiedades de este material, se debe conocer la curva tensión-deformación además de sus propiedades mecánicas. En la figura 14 se muestra la curva tensión-deformación de la espuma de baja densidad.

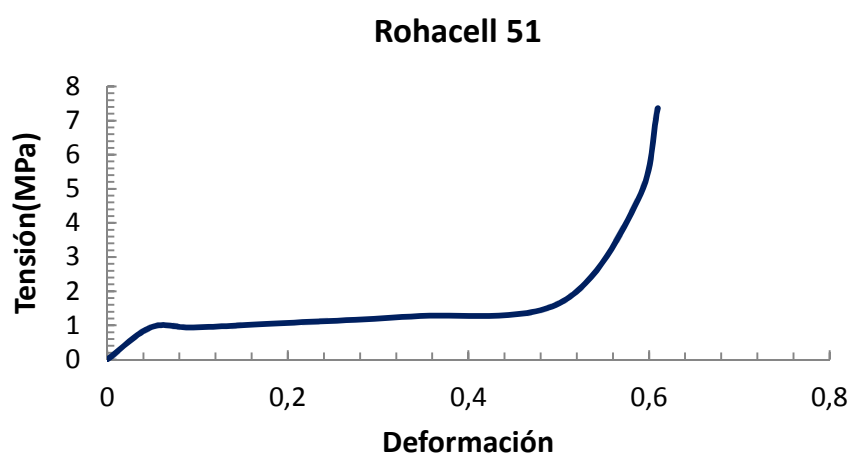


Fig. 14 Curva tensión deformación 51WF

En la tabla 7 se pueden ver las propiedades de la espuma de PMI 51WF:

Tabla 7 Propiedades 51WF

Espuma	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de elasticidad[MPa]	Tensión máxima[MPa]	Coefficiente de Poisson[ ]
Rohacell 51WF	51	75	0,8	0,29

La curva de tensión-deformación para la espuma de alta densidad se muestra en la figura 15:

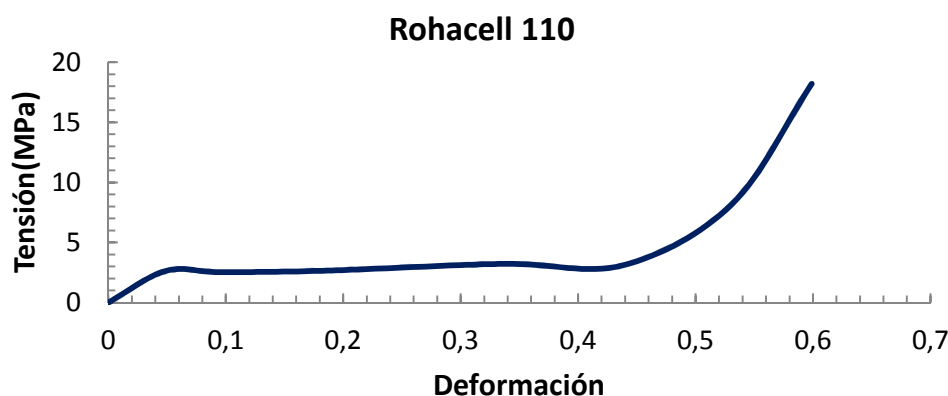


Fig. 15 Curva tensión deformación 110WF.

En la tabla 8 se muestran las propiedades de la espuma de alta densidad:

Tabla 8 Propiedades 110WF.

Espuma	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de elasticidad[MPa]	Tensión máxima[MPa]	Coefficiente de Poisson[ ]
Rohacell 110WF	110	180	2,65	0,29

De los valores de las curvas tensión-deformación se escogen varios puntos característicos. El núcleo se define como “Cruhable foam” dentro del código de elementos finitos Abaqus.

### 3.2.3. Interacciones

En este apartado se explican las interacciones que se han incluido en el modelo numérico. En total se deben definir un total de cuatro interacciones, la primera entre el proyectil y la placa, la segunda entre los apoyos y la placa, la tercera entre las pieles y el núcleo, y por último hay que suponer que el proyectil se comporta como un sólido rígido.

Lo primero que se debe hacer es crear una propiedad de contacto, para ello se crea un contacto tangencial entre la placa y los apoyos, en este contacto se definirá un coeficiente de rozamiento de 0,1 para que los apoyos ofrezcan resistencia al deslizamiento, y un contacto normal entre la placa y el proyectil.

La primera interacción a describir se produce entre el proyectil y la placa, donde la superficie principal será la del proyectil y la secundaria la correspondiente a la estructura sándwich (Fig. 16).

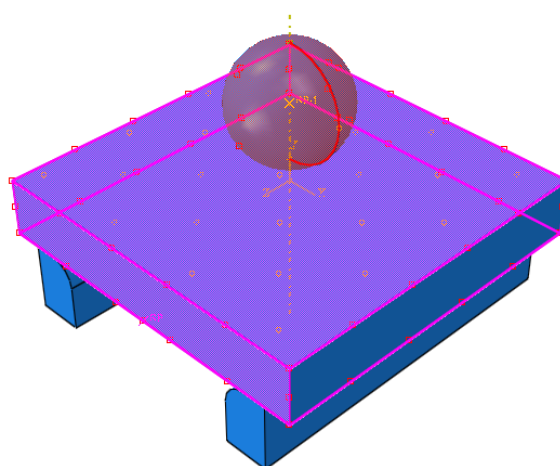


Fig. 16 Interacción proyectil con placa.

Otra interacción es la que se produce entre los apoyos y la placa (Fig. 17), en concreto, entre la placa inferior y las superficies que puedan estar en contacto con la placa. Este contacto tendrá un coeficiente de rozamiento de 0,1.

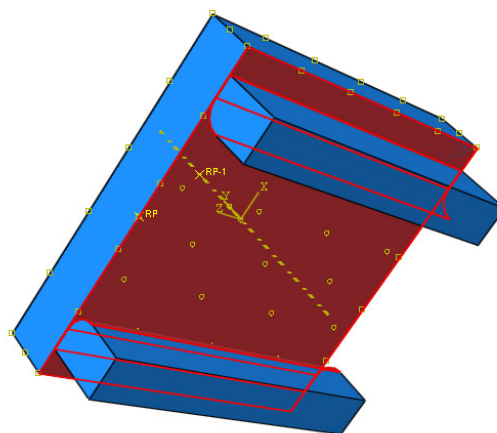


Fig. 17 Interacción placa con apoyos.

También se tendrá que crear una interacción entre el núcleo de PMI del sándwich y las pieles del material compuesto. Para ello se elige una unión tipo “Tie” que una las dos pieles al núcleo. En la figura 18 se muestra la interacción con la superficie superior.

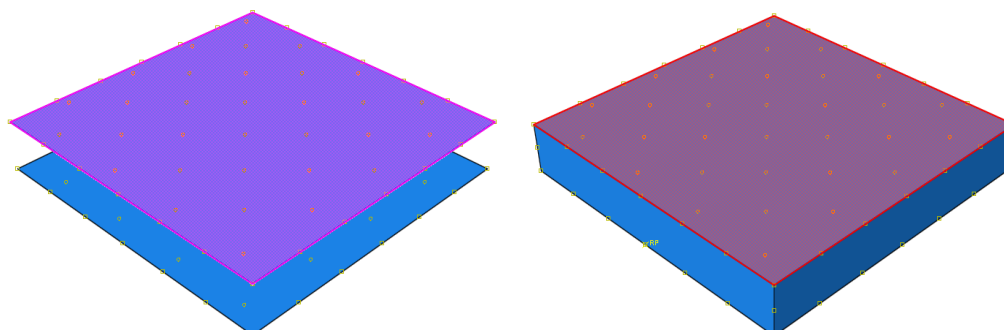


Fig. 18 Interacción pieles con núcleo

Por último, se aplicará al proyectil una condición de contorno para que se comporte como un sólido rígido (Fig. 19) y además se dará una inercia al mismo que corresponda a la masa que requiera el proyectil, que en el caso estudiado es de 1,8 kg.

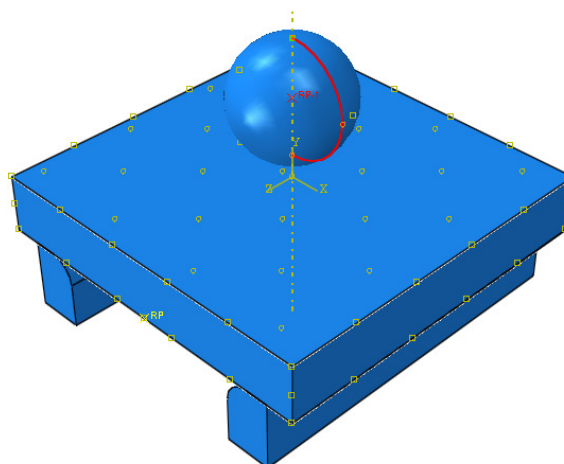


Fig. 19 Condición de solido rígido para el proyectil.

### 3.2.4. Condiciones iniciales

El proyectil lleva velocidad en dirección perpendicular a la placa (Fig. 20), asumiendo que la energía del proyectil es solo cinética, ya que está situado lo suficientemente cerca de la placa como para poder despreciar la energía potencial.



Gracias a lo dicho anteriormente la energía de impacto del proyectil se puede calcular como la energía cinética a través de la siguiente expresión:

$$E = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad \text{Ec. 3.1}$$

Dónde:

E: es la energía cinética

v: es la velocidad

m: es la masa

Tabla 9 Energías y velocidades de impacto

Energía[J]	Velocidad[m/s]
3,8	2,055
8,5	3,073
13,5	3,873
17,5	4,410
22,5	5,00

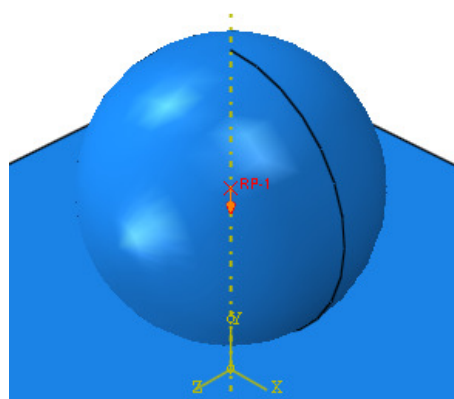


Fig. 20 Dirección de la velocidad de impacto.

### 3.2.5. Condiciones de contorno

Sobre el modelo se aplican varias condiciones de contorno, la primera consiste en el empotramiento de los apoyos, restringiendo cualquier movimiento como se muestra en la figura 21.

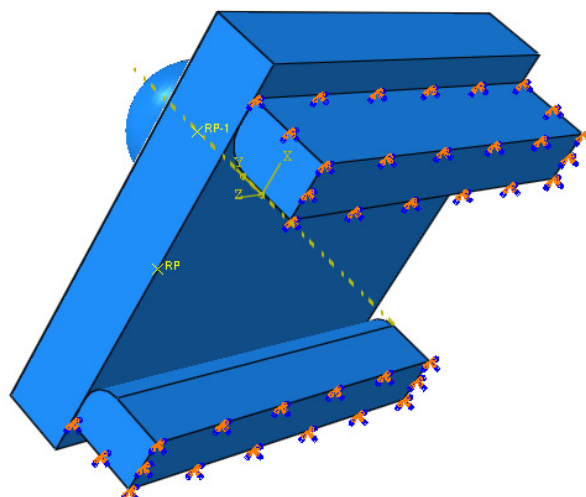


Fig. 21 Condiciones de contorno de los apoyos.

La segunda condición de contorno (Fig. 22) involucra al proyectil, impidiendo cualquier giro indeseado y restringiendo sus movimientos en el plano paralelo al que forma la cara superior de la placa. De esta manera el proyectil solo se podrá mover en dirección perpendicular a la placa sándwich durante la simulación del impacto, es decir, en dirección de la velocidad impuesta.

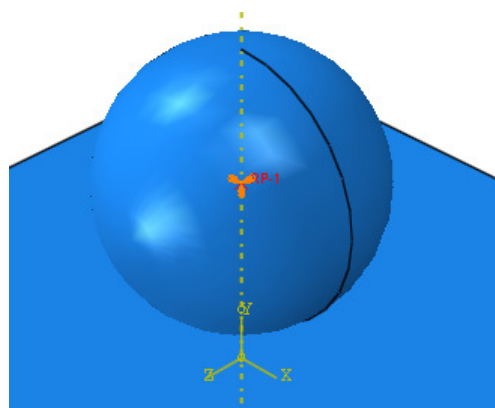


Fig. 22 Restricción de movimiento del proyectil.

### 3.2.6. Mallado

En este apartado se describe cómo se ha mallado cada una de las partes del modelo: el proyectil, los apoyos y la placa sándwich.

### **Proyectil**

El mallado del proyectil como se puede ver en la figura 23 consta de 600 elementos hexagonales sólidos C3D8R, aun pareciendo un mallado escaso es suficiente ya que la información y los resultados requeridos son aquellos procedentes de la placa y no del proyectil.

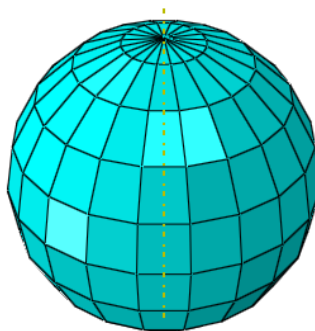


Fig. 23 Mallado del proyectil.

### **Apoyos**

Al igual que en el caso del proyectil, no es necesario hacer una malla demasiado refinada. Para los dos apoyos se han utilizado elementos hexagonales tipo C3D8R en Abaqus. Se utilizó 648 elementos para cada apoyo como se muestran en la figura 24.

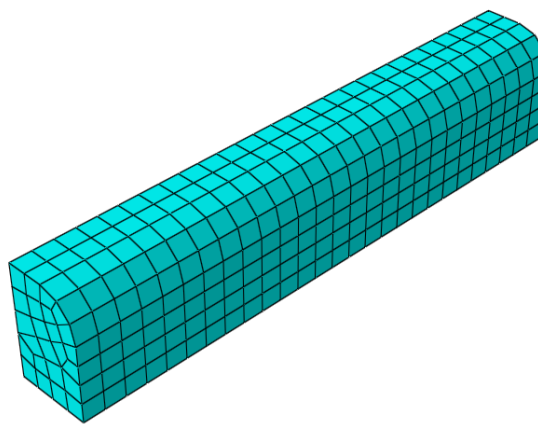


Fig. 24 Mallado de los apoyos.

### **Estructura sándwich**

Se escoge una malla estructurada en toda la placa ya que no solo la zona del impacto es una zona importante de estudio, sino que el contacto entre los apoyos y la placa también tiene relevancia a la hora de realizar la simulación.

Para modelizar la estructura sándwich se requiere hacer un estudio de sensibilidad de malla para así comprobar que influencia tiene el tamaño de los elementos en los resultados. Se realizaron varias simulaciones, aumentando el número de elementos tanto en las pieles como en el núcleo. La variable a estudiar para analizar la influencia del tamaño de malla es la fuerza de contacto entre el proyectil y la placa.

En la figura 25, se puede observar la gráfica con los valores de fuerza de contacto para las diferentes mallas. La tendencia que se observa es que a número de elementos bajos existe cierta dispersión de los valores, mientras que cuando el número de elementos es alto, tiende a estabilizarse en valor.

Se hicieron diferentes modelos de mallado con particiones, pero debido a que el tamaño de la placa era reducido y que en ocasiones se producía distorsiones en el mapa de tensiones se eligió una malla estructurada entera.

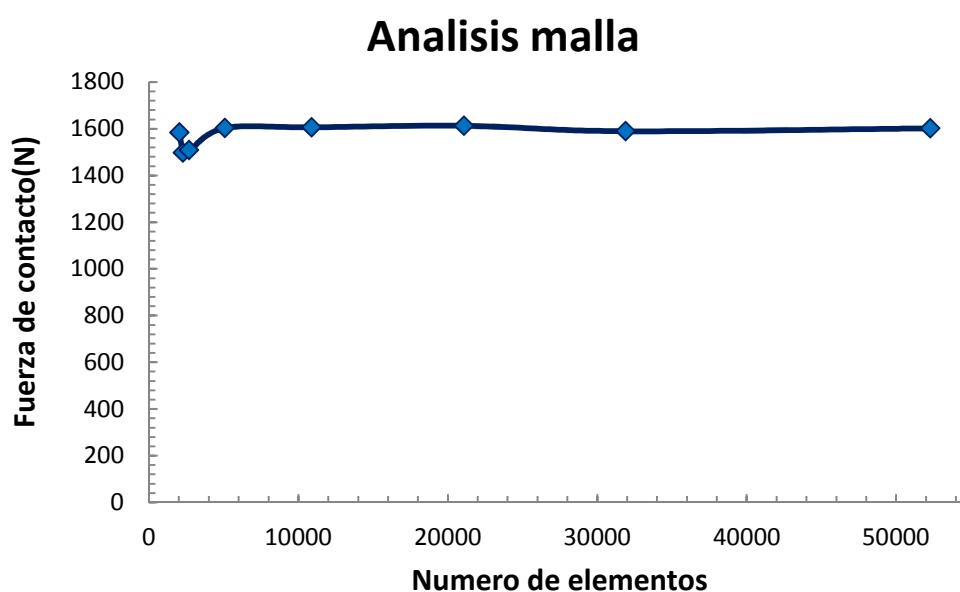


Fig. 25 Análisis de malla de la estructura sándwich.

Tabla 10 Análisis de malla para cada número de elementos.

Total elementos	Fuerza de contacto[N]
2046	1583,98
2280	1497,77
2696	1508,18
5096	1603,35
10896	1606,3
21096	1612,85
31896	1589,45
52296	1601,93

Se puede observar en el análisis de malla que al principio los resultados varían y no son constantes por esto escoger una malla demasiado gruesa podría llevar a tener algún error en el procedimiento o en los cálculos de los resultados, por ello se ha escogido una malla donde ya los resultados se mantuviesen constantes, quedando un número de elementos en el núcleo de 25000 y en las pieles de 2500 elementos como se muestran en la figura 26 y 27 respectivamente.

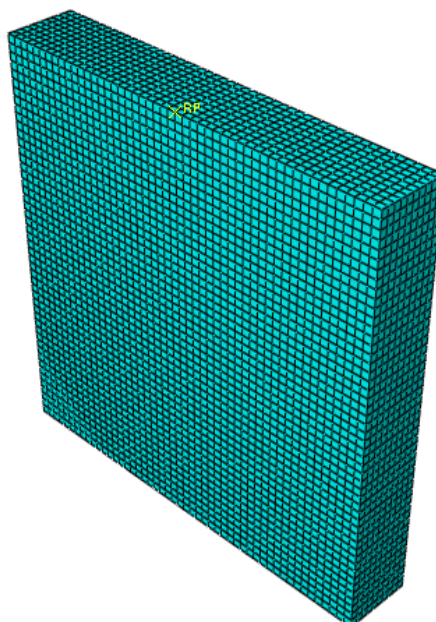


Fig. 26 Mallado de el núcleo.

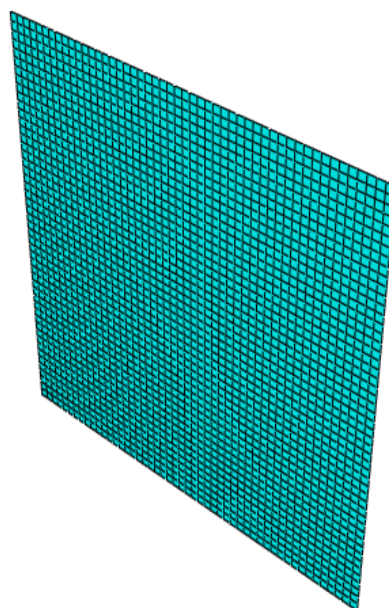


Fig. 27 Mallado de las pieles.

Nuestro conjunto total con todas las partes unidas tendrá 31896 elementos, con este mallado calcularemos todas las fuerzas y energías que se realizarán en el estudio posterior. La malla se mostrara en la siguiente figura 28.

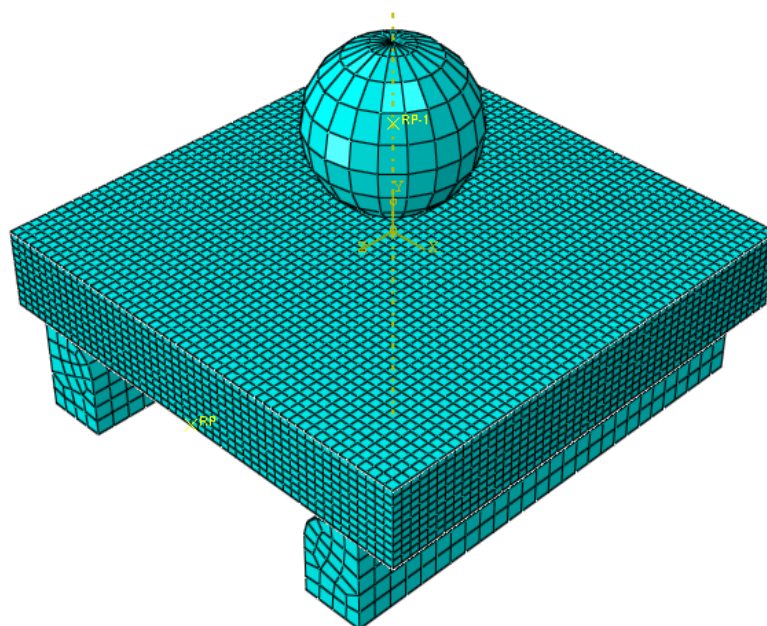


Fig. 28 Mallado del conjunto entero.

## 4. VALIDACIÓN Y RESULTADOS

---

## 4.1.Introducción

En este capítulo, se muestra en primer lugar la validación del modelo numérico desarrollado en el presente trabajo mediante su comparación con los resultados experimentales obtenidos por Anderson y Madenci en 1996 [1]. Dicha validación se ha llevado a cabo en términos de fuerza de contacto máxima y fuerza frente a tiempo para diversas energías de impactos en tres tipos de estructura sándwich.

En segundo lugar, una vez validado el modelo, se obtendrán diversos resultados, como la energía absorbida y el mapa tensional durante el impacto, que ayuden a describir el comportamiento de las estructuras sándwich estudiadas bajo diferentes energías de impacto.

## 4.2.Validación del modelo numérico

### 4.2.1. Fuerza de contacto máxima

En primer lugar, se realiza la comparación entre los resultados numéricos y experimentales para la fuerza máxima de contacto proyectil-estructura sándwich. Esta comparación se muestra en la figura 29 para las estructuras sándwich Tipo I.

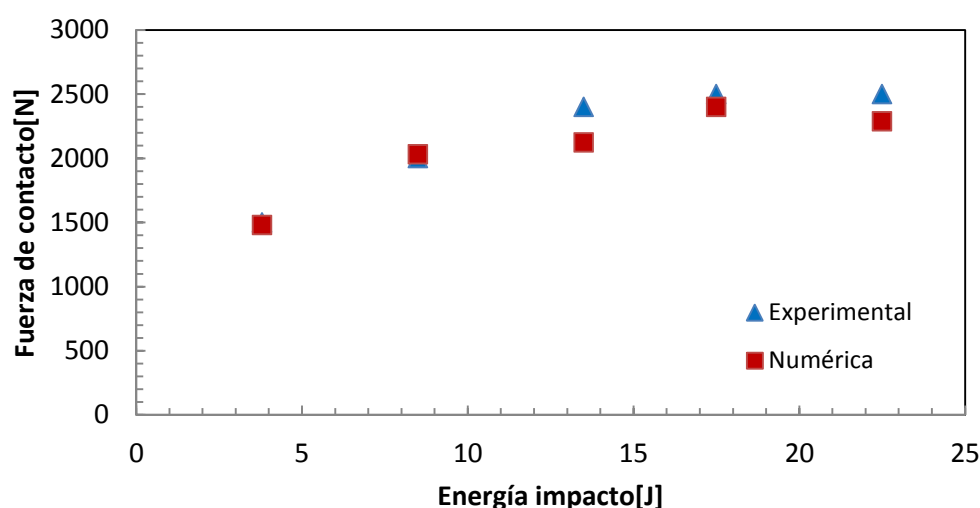


Fig. 29 Comparativa entre las energías de impacto y la fuerza de contacto máxima para el modelo Tipo I (51WF y 3 láminas).

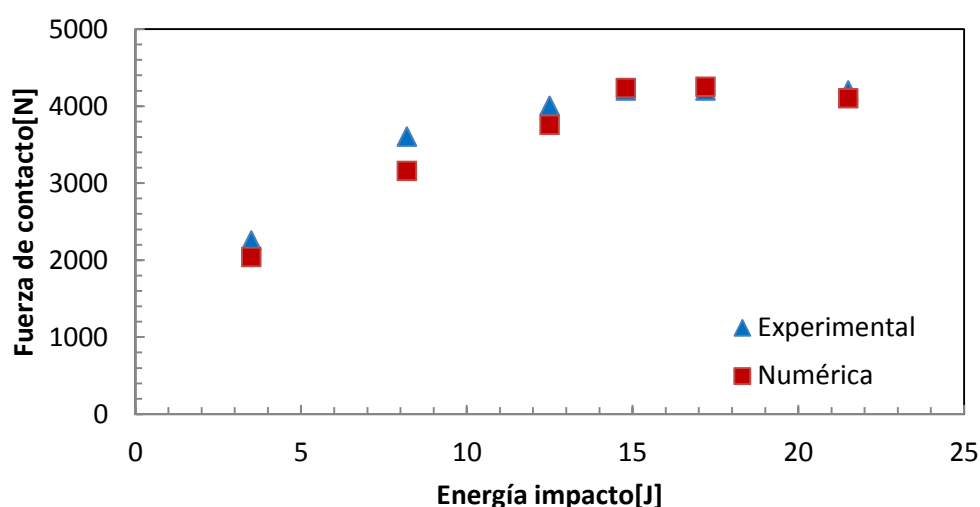


En la figura 29 se observan las similitudes entre ambos resultados, tanto en valor como en tendencia. No obstante a partir de una energía de impacto de 15 J las diferencias observadas son mayores. La fuerza de contacto máxima numérica es menor que la experimental, tal y como se aprecia en detalle en la tabla 11, donde para todas las energías de impacto estudiadas el error es menor de un 12%, lo cual es un límite aceptable en términos de validación. Estas diferencias pueden ser debidas a que no se realizaron suficientes ensayos experimentales, o que no está definido un mecanismo de fallo que represente la realidad.

**Tabla 11 Diferencia entre resultados experimentales y numéricos para el modelo Tipo I (51WF y 3 láminas).**

Datos experimentales		Datos numéricos	
Energía [J]	Fuerza de contacto máxima[N]	Fuerza de contacto máxima[N]	Error [%]
3,8	1500	1480,11	1,32
8,5	2000	2029,53	1,47
13,5	2400	2122,12	11,57
17,5	2600	2399,78	4,01
22,5	2600	2286,53	8,54

Análogamente, se ha realizado el mismo estudio para las estructuras sándwich Tipo II y Tipo III, cuyas tendencias y resultados se muestran en las figuras 30 y 31, y tablas 13 y 14, respectivamente.



**Fig. 30 Comparativa entre las energías de impacto y la fuerza de contacto máxima para el modelo Tipo II (110WF y 3 láminas).**

Tabla 12 Diferencia entre resultados experimentales y numéricos para el modelo Tipo II (110WF y 3 láminas).

Datos experimentales		Datos numéricos	
Energía [J]	Fuerza de contacto máxima[N]	Fuerza de contacto máxima[N]	Error [%]
3,5	2250	2040,09	9,33
8,2	3600	3156,09	12,33
12,5	4000	3755,36	6,12
14,8	4200	4233,83	0,81
17,2	4200	4250,11	1,19
21,51	4200	4098,98	2,4

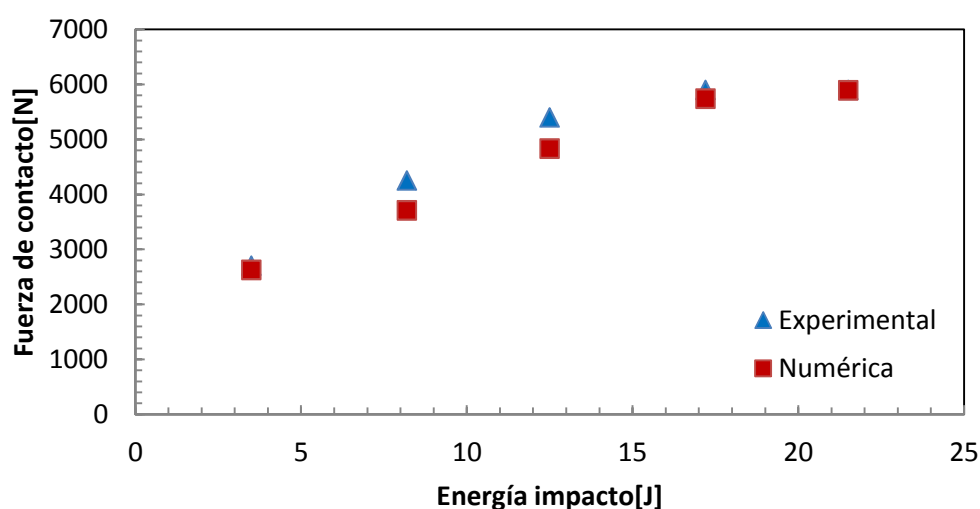


Fig. 31 Comparativa entre las energías de impacto y la fuerza de contacto máxima para el modelo Tipo III (110WF y 6 láminas).

Tabla 13 Diferencia entre resultados experimentales y numéricos para el modelo Tipo III (110WF y 6 láminas).

Datos experimentales		Datos numéricos	
Energía [J]	Fuerza de contacto máxima[N]	Fuerza de contacto máxima[N]	Error [%]
3,5	2700	2.627	2,72
8,2	4250	3708,29	12,75
12,5	5400	4834,6	10,47
17,2	5900	5741,92	2,68
21,51	5900	5893,25	0,11

Al igual que para las estructuras Tipo I, existen claras similitudes, en valores y tendencias entre los resultados numéricos y experimentales, tanto para las estructuras Tipo II

como para las Tipo III, En ambos casos la mayor diferencia entre resultados es de un 13%, lo cual sigue siendo un valor aceptable en términos de validación.

#### 4.2.2. Fuerza de contacto frente al tiempo

En cuanto a la comparación de la curva fuerza de contacto-tiempo, en la figura 32 se observa que tanto la forma como la fuerza pico de los resultados experimentales y numéricos son muy parecidos.

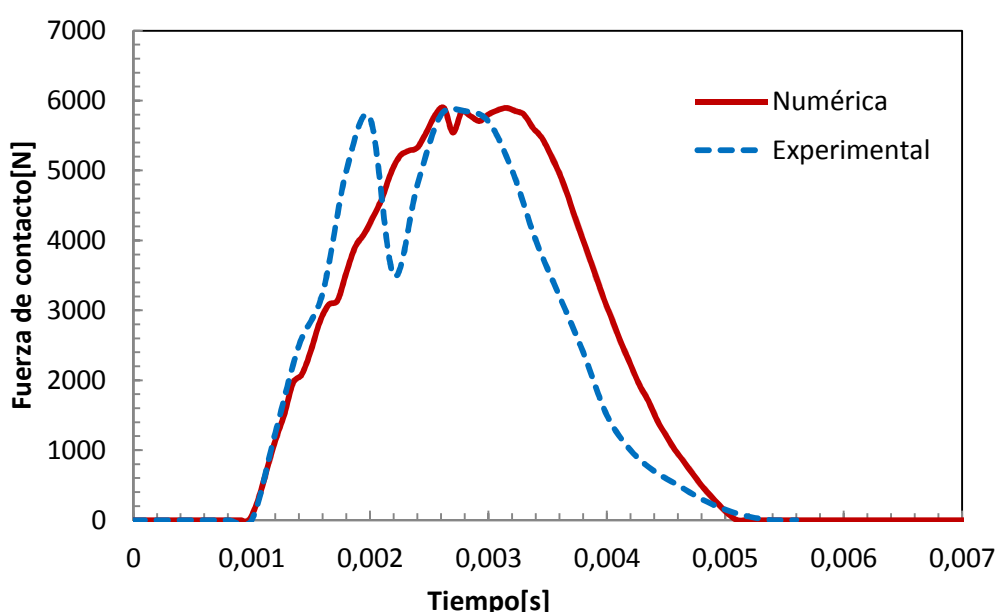


Fig. 32 Comparativa de la curva fuerza de contacto en función del tiempo para un panel de 6 láminas ( $0_2^\circ/90_2^\circ/0_2^\circ$ ) y núcleo 110WF, sometido a un impacto de 21.52 J.

En la figura 32 se aprecian pequeñas diferencias entre ambas curvas. Los resultados experimentales muestran una caída brusca en el valor de fuerza frente a tiempo al alcanzar la fuerza máxima del impacto, mientras que la curva numérica presenta continuidad. Esta caída en los resultados experimentales puede ser debida al proceso de delaminación existente en las pieles de material compuesto, mecanismo de fallo que el modelo numérico no es capaz de reproducir con exactitud. No obstante, el modelo desarrollado sí es capaz de predecir el tiempo de contacto proyectil-placa sándwich, estando la diferencia entre resultados experimentales y numéricos por debajo del 7%.

A la vista de los resultados obtenidos en los apartados 4.2.1 y 4.2.2, se puede afirmar que el modelo numérico queda validado.

### 4.3.Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para distintas energías de impacto sobre las placas sándwich Tipo I, es decir, para aquellas con núcleo de espuma 51WF y pieles de laminado  $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ . Las variables a estudiar son:

- Fuerza contacto-Tiempo
- Energía Cinética-Tiempo
- Energía Absorbida-Energía de impacto
- Mapa de tensiones

#### 4.3.1. Fuerza contacto-Tiempo

En la figura 33 se representa la fuerza de contacto en función del tiempo para diferentes energías de impacto.

En general, se aprecia que cuanto mayor es la energía de impacto, mayor es la fuerza de contacto máxima. A partir de una energía de impacto de 13,98J, la fuerza de contacto máxima deja de aumentar y se mantiene en torno un valor constante de 2250N. Así mismo, cuanto mayor es la energía del impacto mayor es el tiempo que está en contacto el proyectil con la placa debido al deslizamiento de la placa entre los apoyos.

También se observa que cuanto mayor es la energía de impacto aparece ruido en la señal de fuerza en forma de picos. Esto se debe al daño originado en alguno de los elementos de la piel de material compuesto.

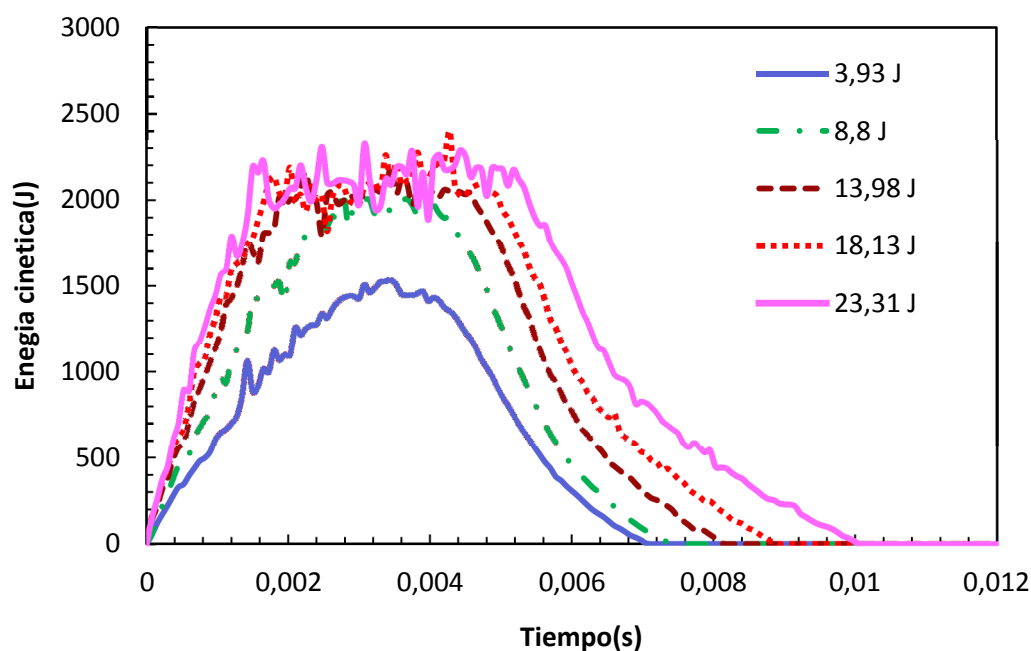


Fig. 33 Curvas fuerza de contacto-tiempo numérica. Comparación entre diferentes energías de impacto.

#### 4.3.2. Energía Cinética-Tiempo

En la figura 34 se muestra la variación de la energía cinética del proyectil respecto al tiempo para el rango de energías de impacto estudiado. Todas las curvas presentan la forma típica esperada para un ensayo de impacto a baja velocidad.

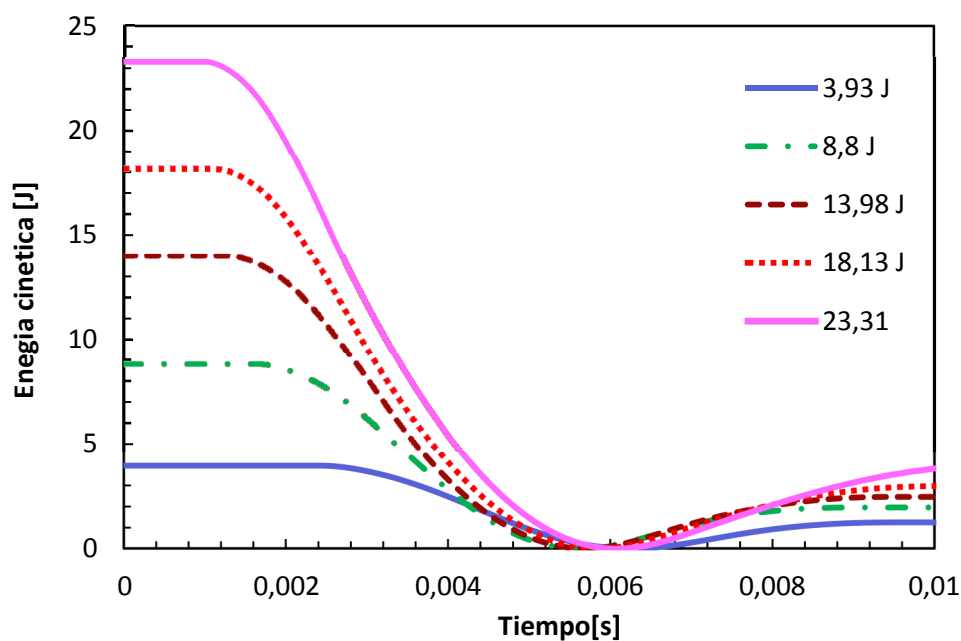


Fig. 34 Curvas de energía cinética frente al tiempo para varias energías de impacto.

En el inicio de la curva, el proyectil mantiene energía cinética constante hasta entrar en contacto con la placa, es entonces cuando el proyectil comienza a perder energía transmitiéndosela a la placa mediante el impacto. Dicha energía continua disminuyendo hasta alcanzar un mínimo, momento en el que se produce el rebote del proyectil. Posteriormente, la energía cinética del proyectil vuelve a aumentar ligeramente, hasta alcanzar un valor que se mantiene constante una vez la placa y el proyectil dejan de estar en contacto, dicha velocidad es denominada velocidad residual.

Por lo tanto, mediante estas curvas, se puede hacer el cálculo de la energía absorbida por la placa, siendo esta la diferencia entre la energía inicial o de impacto y la energía final o residual.

$$\text{Energía absorbida} = \text{Energía inicial} - \text{Energía final} \quad \text{Ec. 4.1}$$

### 4.3.3. Energía Absorbida-Energía de impacto

En la figura 35 se muestran los resultados de energía absorbida frente a la energía de impacto para distintos niveles de energía.

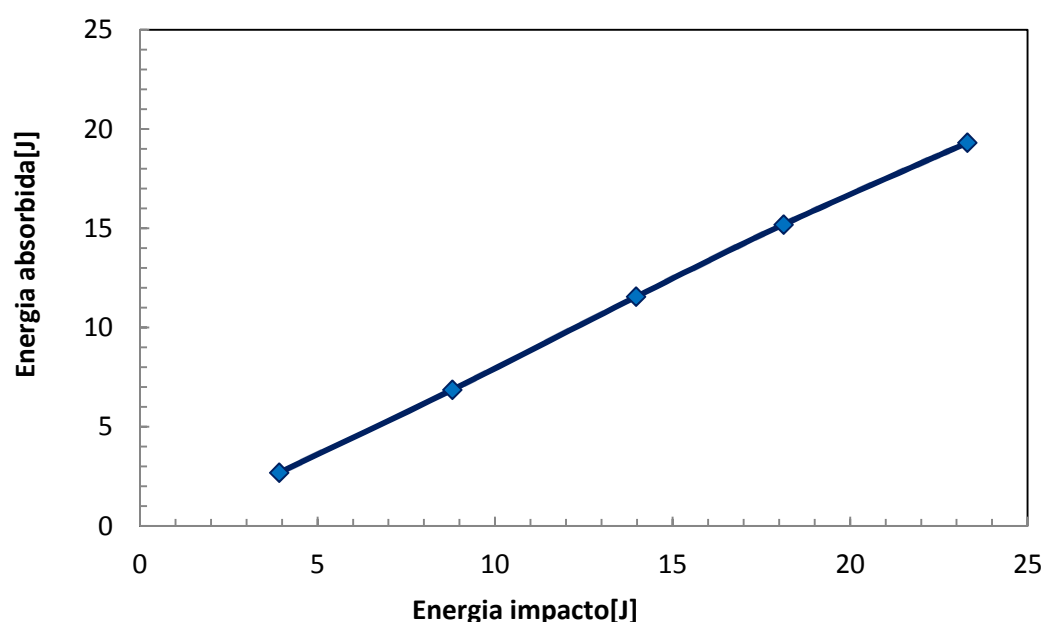


Fig. 35 Relación de la energía de impacto con la energía absorbida para estructura sándwich de núcleo 51WF y 3 láminas.

Se observa que la energía absorbida es directamente proporcional a la energía del impacto, presentando una tendencia lineal ascendente. Al no tener datos experimentales, la tendencia de esta grafica se compara con otro estudio de estructuras sándwich de impactos a baja velocidad [17]. Se observa una tendencia creciente, pero con diferentes resultados ya que son diferentes materiales.

En la tabla 14 se muestran los resultados de energía absorbida, tanto en valor absoluto como en porcentaje. El porcentaje de energía absorbida es menor en los casos de menor energía de impacto. A partir de un valor aproximado de 13J dicho valor se mantiene constante, es decir, por más que se aumente la energía de impacto la capacidad de absorción no variara.

**Tabla 14 Energía de impacto y energía absorbida.**

<b>Energía impacto[J]</b>	<b>Energía absorbida[J]</b>	<b>Porcentaje de energía absorbida [%]</b>
3,93	2,69	68,45
8,80	6,86	77,95
13,98	11,55	82,62
18,13	15,19	83,78
23,31	19,31	82,84

#### **4.3.4. Mapa de tensiones**

Los mapas de tensiones se muestran en las figuras 36, 37 y 38. Se observa que para el caso de menor energía de impacto (3,62J), el mapa es prácticamente simétrico durante el contacto del proyectil, así como la estructura para estas energías de impacto apenas se desplaza. A mayores energías se aprecia que si existe desplazamiento tanto en 13,98J como en 23,31J. En estos dos casos se observa que las tensiones son máximas en la zona del impacto, y que cuando se inicia el desplazamiento de la placa, las máximas tensiones son alcanzadas en los lados libres.

S, Mises  
SNEG, (fraction = -1.0)  
(Avg: 75%)

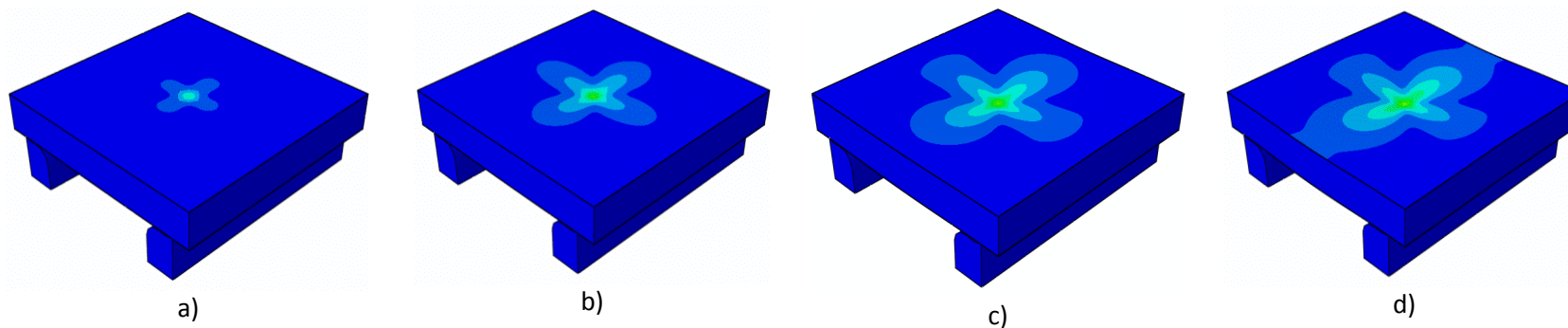
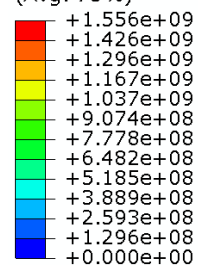


Fig. 36 Mapa de tensiones para la energía de 3,62 J, a) 25%, b) 50%, c) 75%, d) 100%

S, Mises  
SNEG, (fraction = -1.0)  
(Avg: 75%)

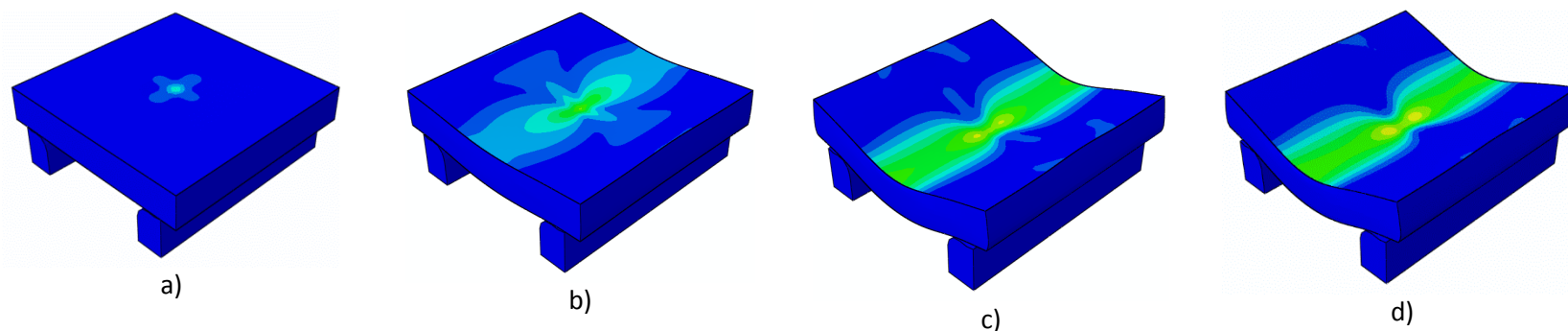
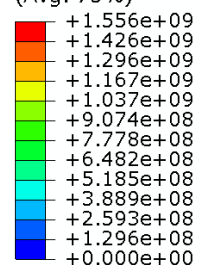


Fig. 37 Mapa de tensiones para la energía de 13,96 J, a) 25%, b) 50%, c) 75%, d) 100%

S, Mises  
SNEG, (fraction = -1.0)  
(Avg: 75%)

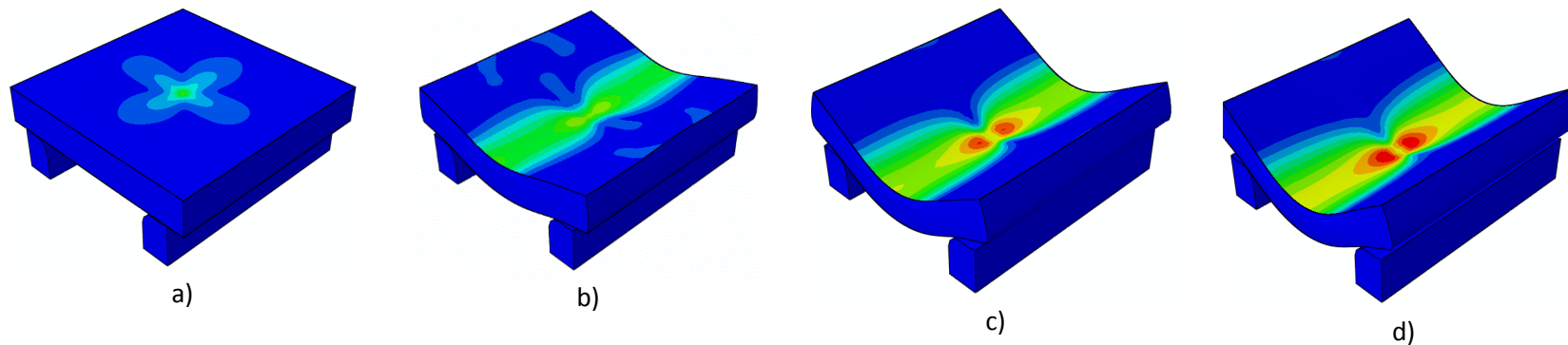
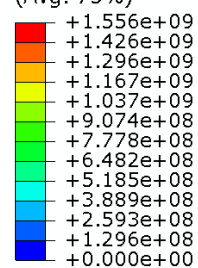
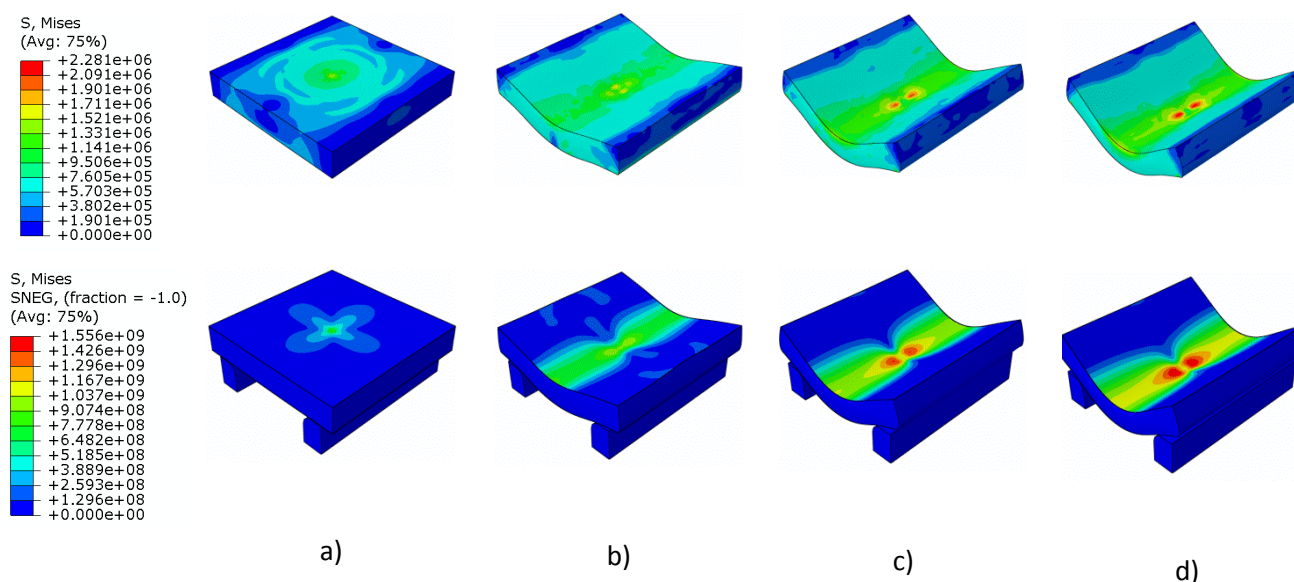


Fig. 38 Mapa de tensiones para la energía de 23,31 J, a) 25%, b) 50%, c) 75%, d) 100%



En la figura 39 se muestran los mapas de tensiones de la estructura sándwich y del núcleo por separado.



**Fig. 39** Mapa de tensiones para la energía de 23,31 J, para el núcleo de espuma y la placa completa: a) 25%, b) 50%, c) 75%, d) 100%

En general, se aprecian similitudes debido a que las tensiones son mayores en los lados no apoyados que en los apoyados, y máximas en la zona del impacto, siendo la distribución de las mismas diferentes debido a los diferentes materiales utilizados. También se observa en la zona del impacto, que en la piel se alcanzan mayores tensiones que en la misma zona del núcleo.

## 5. APLICACIONES A OTROS CASOS

---

## 5.1.Introducción

En este apartado se analizarán los diferentes resultados obtenidos tras llevar a cabo una serie de modificaciones sobre el modelo original. Estas modificaciones se realizarán sobre las condiciones de contorno de la placa sándwich y el ángulo de impacto entre proyectil y placa. Con estos resultados se espera obtener un mayor conocimiento de la respuesta de la estructura sándwich cuando se encuentra sometida a impactos de baja velocidad.

## 5.2.Variación de las condiciones de contorno

A partir del modelo validado, el cual se encuentra biapoyado, se ha decidido realizar un estudio variando las condiciones de contorno de la placa. Se han estudiado dos casos diferentes: placa empotrada en dos de sus lados y placa empotrada en todo su contorno.

### 5.2.1. Placa empotrada en dos de sus lados

En la figura 40 se muestra el modelo en el cual se han empotrado dos de sus lados, manteniéndose la geometría del proyectil y de la placa sándwich inalterable respecto al modelo original.

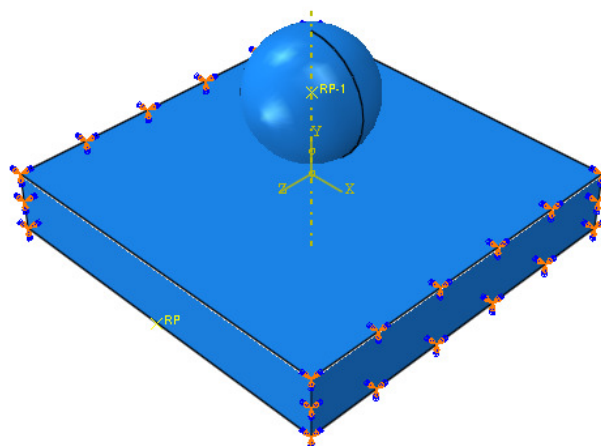


Fig. 40 Modelo impacto a baja velocidad en estructuras sándwich con dos lados empotrados.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos a partir de este nuevo modelo con los pertenecientes al modelo original, se recogerán los datos de fuerza de contacto y energía cinética para las mismas energías de impacto.

En la figura 41 se muestran las curvas fuerza de contacto frente al tiempo para las mismas energías de impacto estudiadas previamente. Se observa como la fuerza de contacto máxima aumenta a medida que lo hace la energía de impacto. Asimismo, el tiempo de contacto proyectil-placa disminuye.

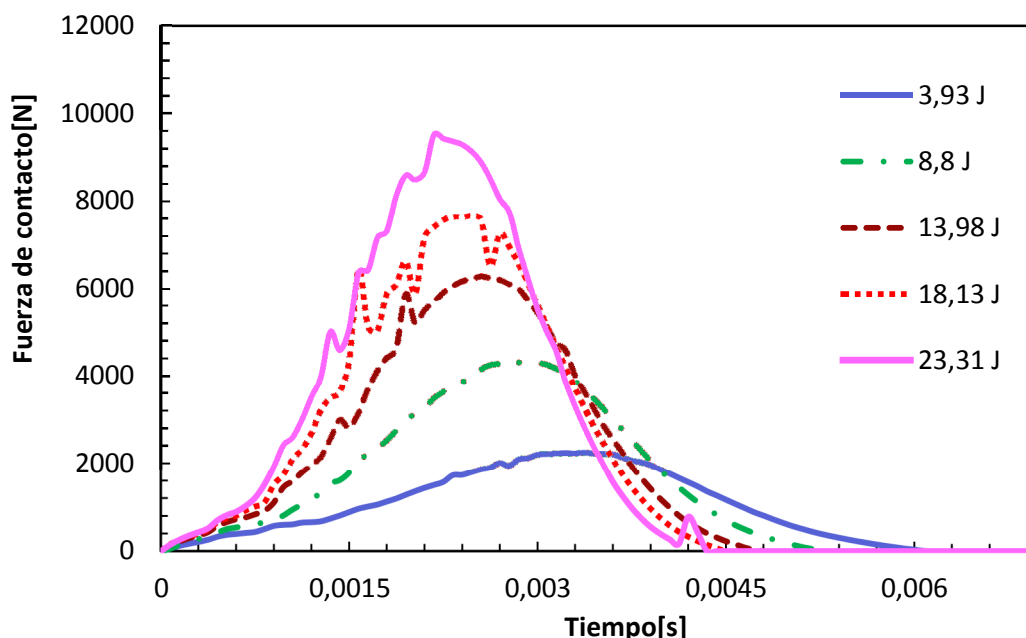


Fig. 41 Curvas fuerza de contacto-tiempo numérica. Comparación entre diferentes energías de impacto, caso dos lados de la placa empotrados.

En la figura 42, se muestra la comparación de la fuerza de contacto en función del tiempo para los casos estudiados en este apartado. Se observan varias diferencias, la más evidente es el aumento de la fuerza de contacto máxima para el caso biempotrado. Aunque los dos impactos comiencen a la vez, en el caso empotrado la fuerza de contacto crece de forma brusca, y no se mantiene en el punto máximo durante tanto tiempo como en el caso apoyado.

Esto es debido a la restricción de movimientos producida por las nuevas condiciones de contorno, que aumentan la resistencia de la placa sándwich a ser desplazada en dirección del impacto. El tiempo de contacto se ve incrementado en el caso de la placa biapoyada para una misma energía de impacto.

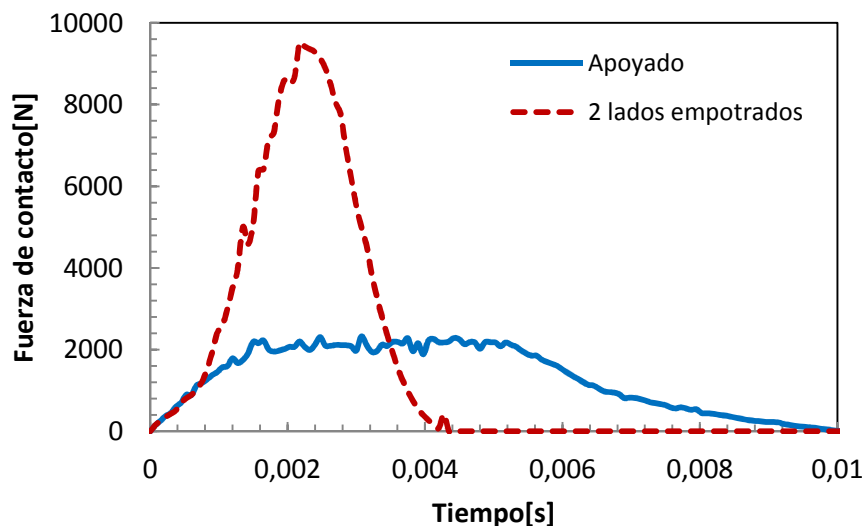


Fig. 42 Comparación de fuerza de contacto en función del tiempo para el caso apoyado y empotrado dos lados. Energía de 23,31 J.

En la figura 43 se muestra la variación de energía cinética respecto a cada energía de impacto. Se puede observar que la energía residual aumenta según el impacto tiene mayor energía, también se observa que a mayor energía el tiempo de contacto es menor ya que la energía cinética cae de forma más brusca

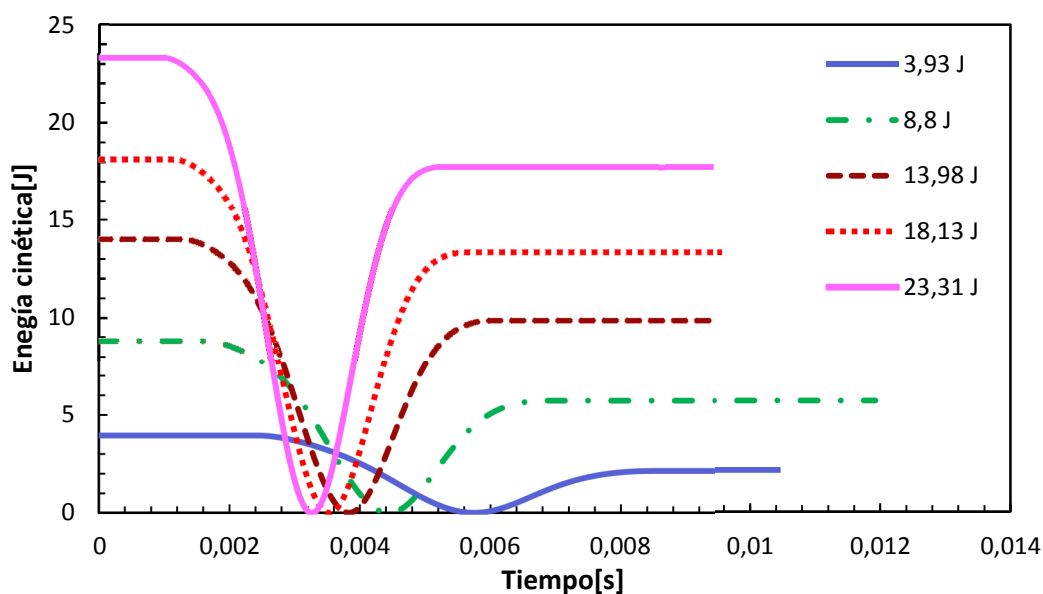


Fig. 43 Curvas de energía cinética frente al tiempo para varias energías de impacto, caso de dos lados de la placa empotrados.

En la figura 44 se observa, que la energía tras el impacto (energía residual) es mayor que en el caso apoyado, esto se debe a que al estar empotrado no desliza la placa por lo que la estructura no absorbe tanta energía, por ello el proyectil sale con mayor energía. También se

aprecia que en el caso biempotrado el tiempo de contacto es menor ya que el punto de inflexión de la curva se alcanza más rápidamente.

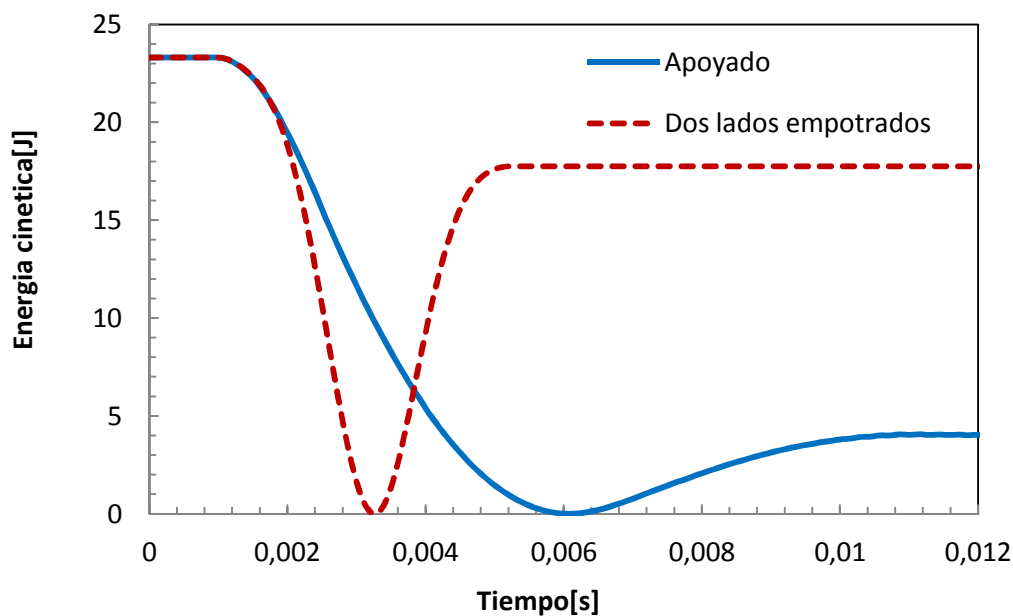


Fig. 44 Comparación de energía cinética en función del tiempo para el caso apoyado y empotrado dos lados. Energía de 23,31 J.

En la figura 45 se compara la energía absorbida para los dos casos, se observa que los dos tienen una tendencia creciente, pero mientras el caso biapoyado absorbe casi toda la energía en el impacto, el caso biempotrado según aumenta la energía de impacto no es capaz de absorber tanta energía. En la tabla 15 se observa esta diferencia para los dos casos y que la capacidad de absorción en el caso biempotrado descende.

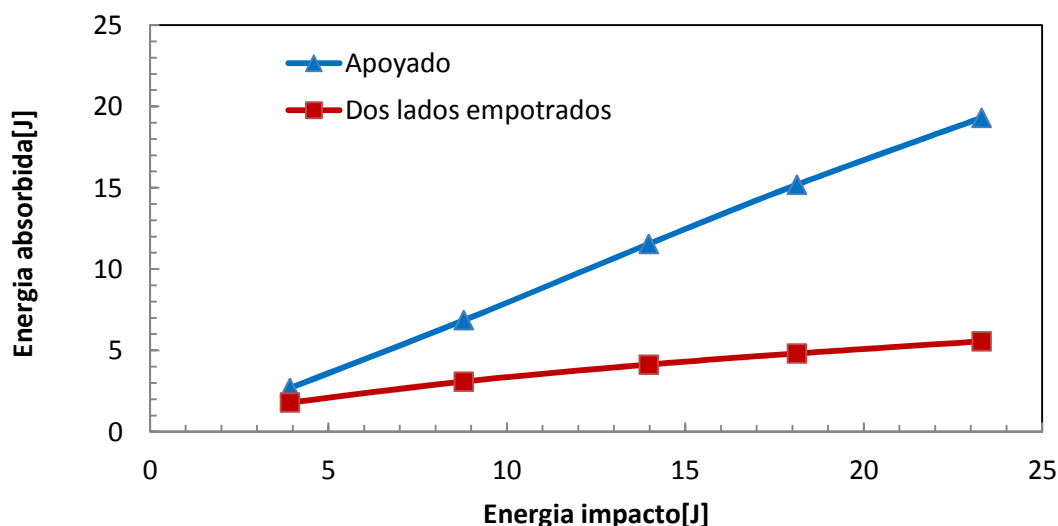


Fig. 45 Comparación de la energía absorbida con la energía de impacto para los casos biapoyado y biempotrado.

Tabla 15 Energía de impacto y energía absorbida para el caso biapoyado y biempotrado.

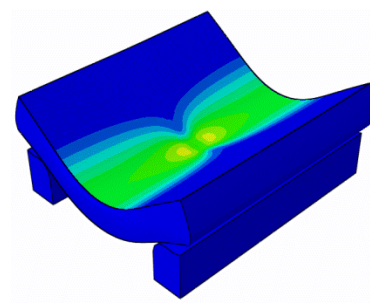
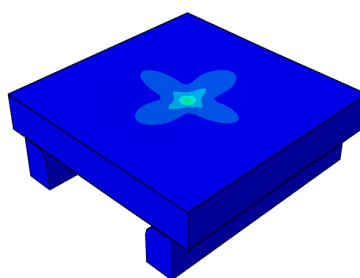
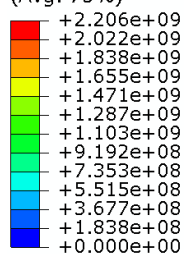
Biapoyado			Biempotrado	
Energía impacto [J]	Energía absorbida [J]	Porcentaje de energía absorbida [%]	Energía absorbida [J]	Porcentaje de energía absorbida [%]
3,93	2,69	68,45	1,8	45,80
8,8	6,86	77,95	3,09	35,11
13,98	11,55	82,62	4,13	29,54
18,13	15,19	83,78	4,81	26,53
23,31	19,31	82,84	5,56	23,85

En la figura 46 se compara la evolución del mapa de tensiones de caso apoyado en dos instantes: cuando el proyectil toma contacto con la placa y cuando la fuerza es máxima.

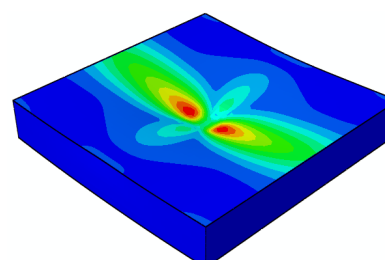
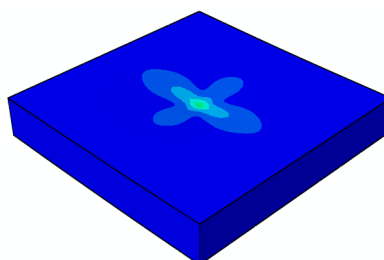
En el instante inicial (figura 46.a) la diferencia entre ambos mapas de tensiones es prácticamente inapreciable; sin embargo, según avanza el impacto las diferencias se hacen más notables. En el caso biempotrado se observa que la tensión en la zona de impacto es mayor y se distribuye hacia los lados que tienen restringido el movimiento (figura 44.b). En el caso biapoyado, la tensión en la zona del impacto es menor ya que se permite el desplazamiento de la placa, produciéndose una mayor flexión en la placa.

### Placa Biapoyada

S, Mises  
SNEG, (fraction = -1.0)  
(Avg: 75%)



### Placa Biempotrada



a)

b)

Fig. 46 Mapa de tensiones para la energía de 23,31 J, para el caso de dos lados empotrados en comparación con el caso apoyado a) 25%, b) 100%,

## 5.2.2. Placa empotrada en todo su contorno

En este apartado se analiza el comportamiento de la placa sándwich sometida a un impacto de baja velocidad cuando ésta se encuentra empotrada en todo su contorno (figura 47). Se comparan los resultados obtenidos con los casos biapoyado y biempotrado. De nuevo se mantiene la geometría de origen.

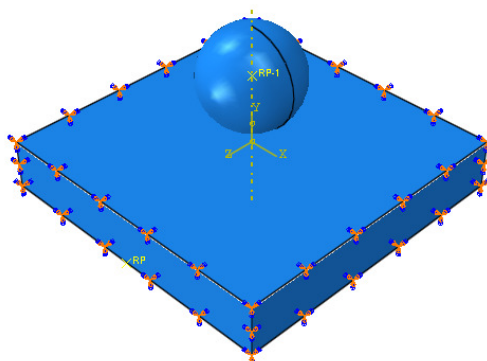


Fig. 47 Modelo impacto a baja velocidad en estructuras sándwich con cuatro lados empotrados.



En la figura 48 se muestran los resultados para la fuerza de contacto a diferentes energías para el caso concreto a estudiar.

Como en casos anteriores, a medida que aumenta la energía de impacto, así lo hace la fuerza máxima de contacto. Al igual que para el caso biempotrado y al contrario que para el biapoyado, el tiempo de contacto decrece a medida que aumenta la energía de impacto.

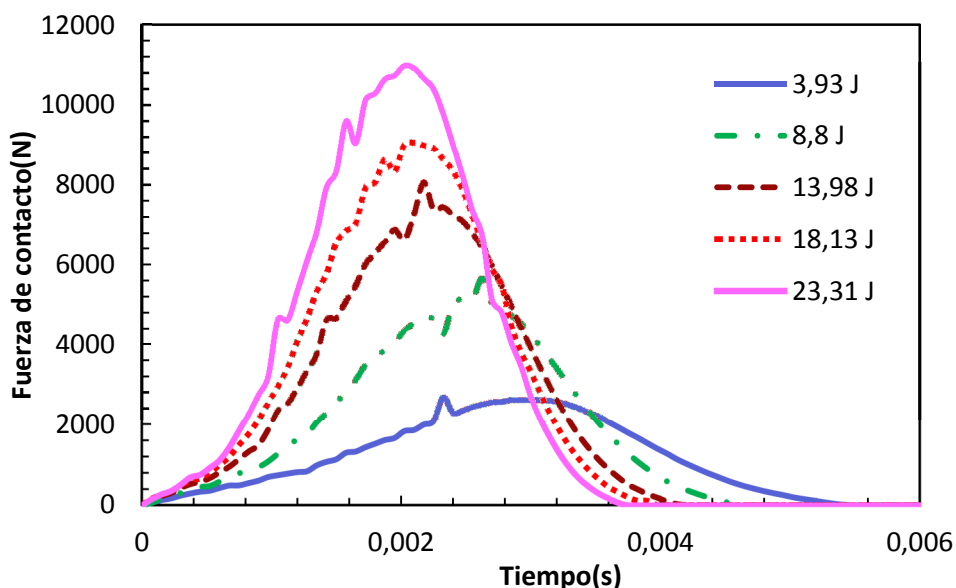


Fig. 48 Curvas fuerza de contacto-tiempo numérica. Comparación entre diferentes energías de impacto, caso cuatro lados de la placa empotrados.

En la figura 47 se comparan las fuerzas de contacto frente a tiempo para una energía de impacto de 23,31 J para las tres condiciones de contorno estudiadas.

Para la placa completamente empotrada la fuerza de contacto presenta un valor de fuerza máxima mayor que en el resto de los casos (16% mayor que para la placa biempotrada). El caso biapoyado es el que presenta una tendencia diferente, tanto en valor de fuerza máxima como en tiempo de contacto. Claramente cuantas más restricciones de movimiento se añadan a la estructura, se observa menos flexión y más resistencia al contacto proyectil-placa. Asimismo se ha observado un comportamiento similar en todas las energías de impacto estudiadas obteniéndose una disminución del tiempo de contacto de aproximadamente un 14% para el caso completamente empotrado frente al biempotrado.

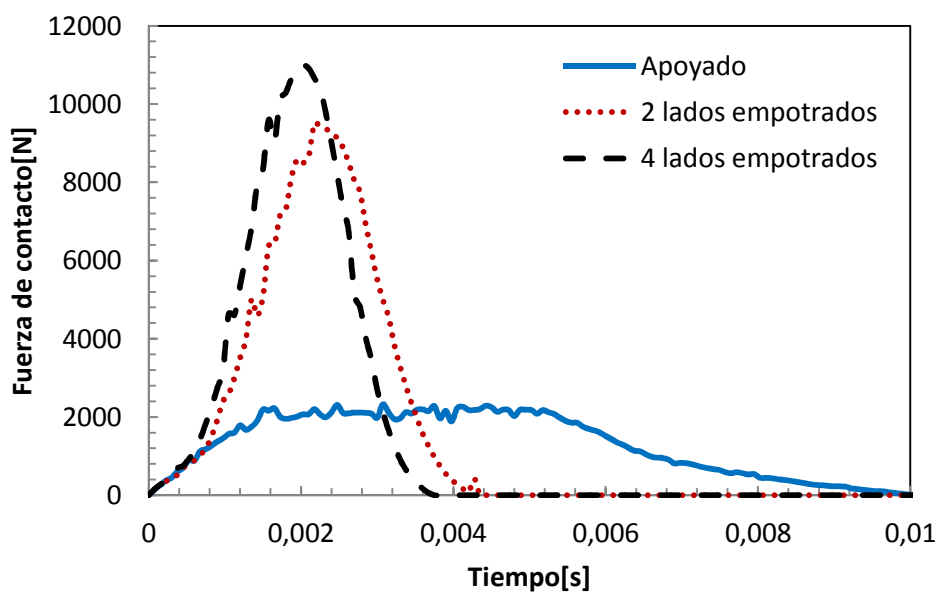


Fig. 49 Comparación de fuerza de contacto en función del tiempo para el caso apoyado, empotrado dos lados y empotrado cuatro lados. Energía de 23,31 J.

En la siguiente figura 48 se muestran la energía cinética en función del tiempo para cinco energías. Se observa un comportamiento parecido al caso biapoyado.

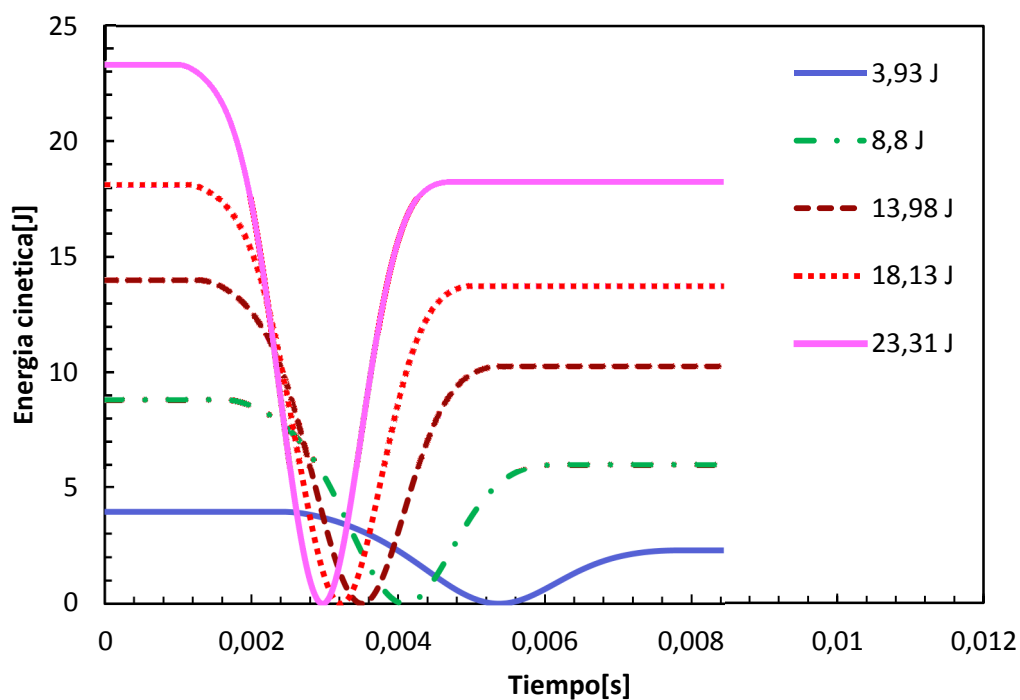


Fig. 50 Curvas de energía cinética frente al tiempo para varias energías de impacto, caso de cuatro lados de la placa empotrados.

Para comparar los tres casos con diferentes condiciones de contorno, en la figura 51 se muestran las curvas de energía cinética frente a tiempo para una energía de impacto de 23,31 J. Se observa que la energía residual es mayor en los casos en los que la placa sándwich tiene alguno de sus lados empotrados en comparación con el caso biapoyado. Esto es debido a que los bordes de la placa sándwich tienen restringidos mayor número de movimientos, produciendo menor flexión y absorbiendo menos energía de impacto.

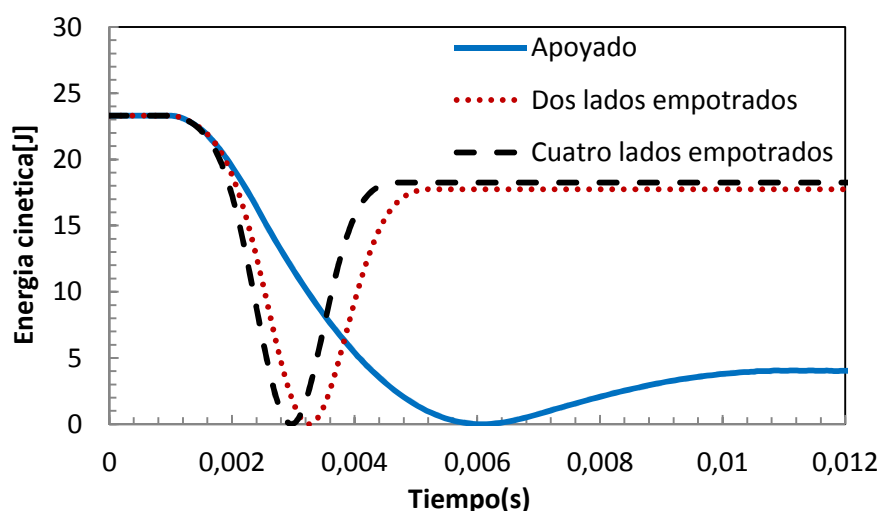


Fig. 51 Comparación de energía cinética en función del tiempo para el caso apoyado, empotrado dos lados y todos los lados empotrados. Energía de 23,31 J.

En la Figura 52 se compara en detalle la energía absorbida frente a la energía de impacto en los tres casos descritos anteriormente. En general, la tendencia es creciente para todas las condiciones de contorno estudiadas, observando mayor pendiente en el caso de la placa biapoyada.

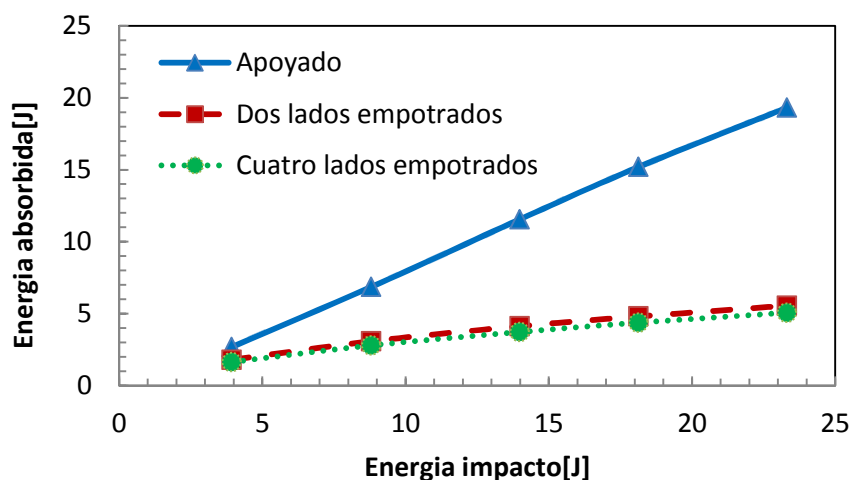


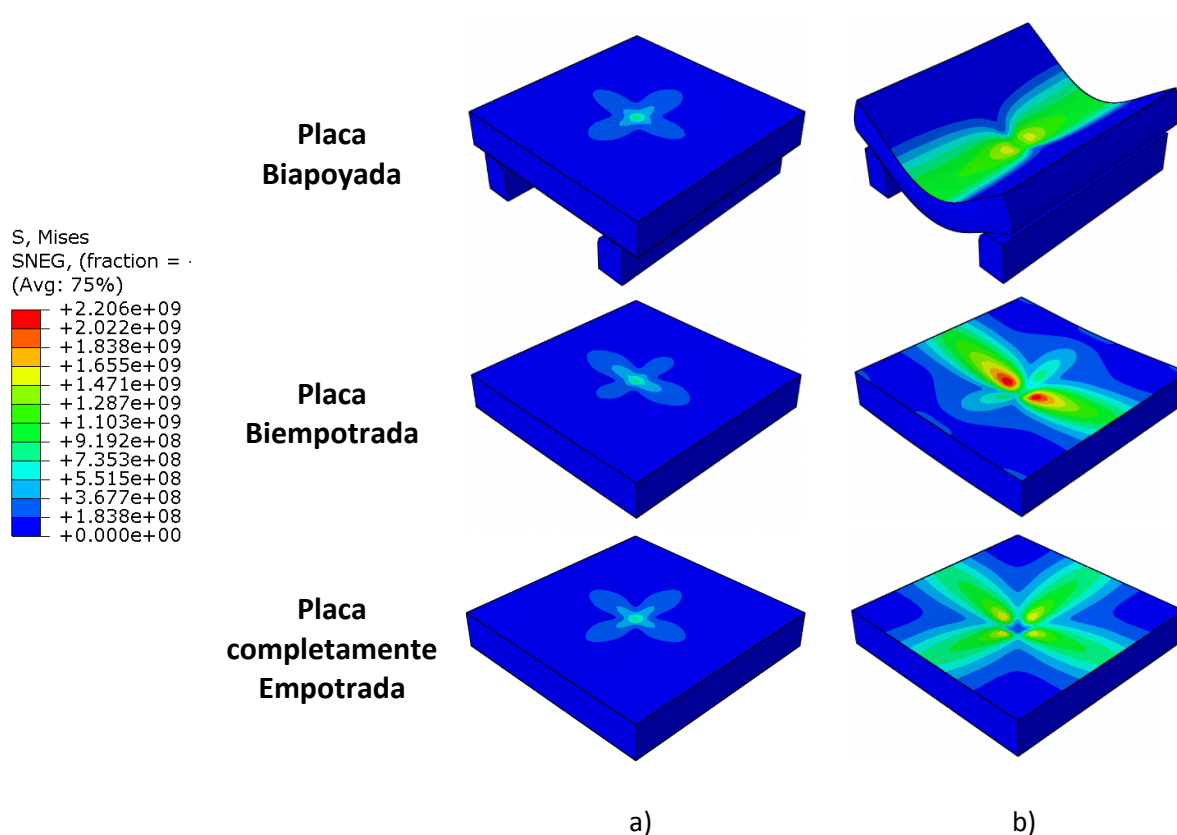
Fig. 52 Comparación de la energía absorbida con la energía de impacto para los casos biapoyado, biempotrado y todos los lados empotrados.

En la tabla 16 se muestran los resultados en porcentaje correspondiente a la energía absorbida en los tres casos. Se observa que para la placa biapoyada, la capacidad de absorción de energía aumenta con la energía de impacto hasta llegar a los 13 J de energía de impacto, dónde se mantiene casi constante. En las placas sándwich con lados empotrados, la energía absorbida disminuye con la energía de impacto.

**Tabla 16 Porcentaje de energía absorbida para los tres casos de condiciones de contorno**

	Biapoyado	Biempotrado	Empotrado todo el contorno
Energía impacto [J]	Porcentaje de energía absorbida [%]	Porcentaje de energía absorbida [%]	Porcentaje de energía absorbida [%]
3,93	68,45	45,80	41,98
8,8	77,95	35,11	31,82
13,98	82,62	29,54	26,68
18,13	83,78	26,53	24,16
23,31	82,84	23,85	21,750

A continuación en la figura 53 se muestran los mapas de tensiones para el caso de cuatro lados empotrados en comparación con los dos casos anteriores.



**Fig. 53 Mapa de tensiones para la energía de 23,31 J, para el caso de dos y cuatro lados empotrados en comparación con el caso apoyado a) 25%, b) 100%.**

Al observar el mapa de tensiones se puede ver que para el caso de cuatro lados empotrados las tensiones se distribuyen de forma simétrica hacia las zonas empotradas, alcanzando la tensión máxima en el centro de la placa durante el contacto. La mayor tensión es registrada en el caso de dos lados empotrados, esto se debe a que toda la tensión es únicamente distribuida en dos lados.

### 5.3.Caso impacto oblicuo

En este apartado se va a analizar la influencia del ángulo de impacto sobre los resultados mostrados anteriormente. Para ello se va a utilizar el modelo biempotrado, modificándose la inclinación de la placa sándwich para conseguir el ángulo de impacto deseado ( $10^\circ$ ,  $30^\circ$  y  $60^\circ$ ), tal y como se muestra en la figura 54.

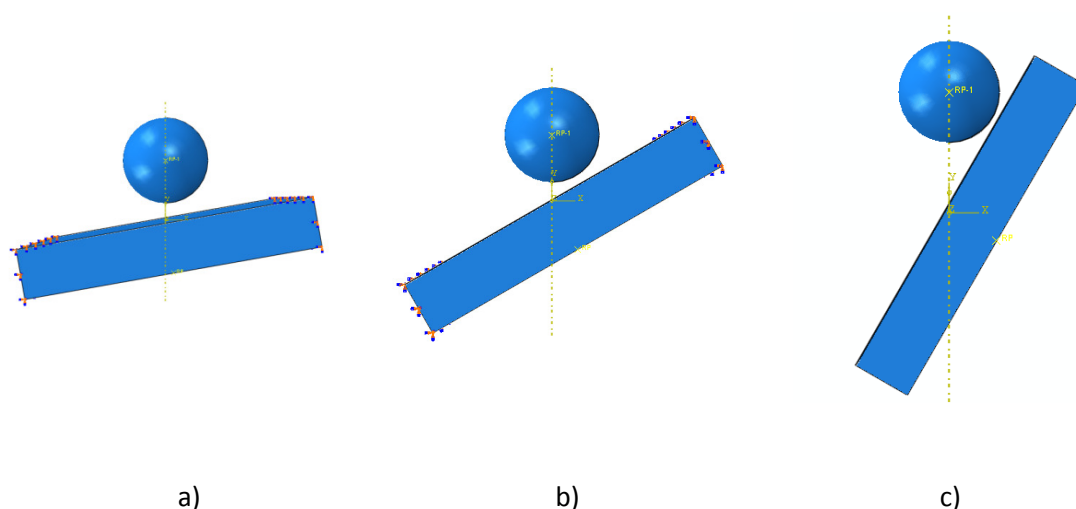


Fig. 54 Modelos de impacto a baja velocidad en estructuras sándwich con dos lados empotrados e impacto oblicuo a)  $10^\circ$ , b)  $30^\circ$ , c)  $60^\circ$ .

Este estudio se realiza para las mismas energías de impacto que en casos anteriores. Las variables a comparar son: la fuerza de contacto y energía residual. En las figuras 55, 56 y 57 se muestra la comparación de la fuerza de contacto frente al tiempo para los tres ángulos a analizar para las energías de impacto de 3,93J, 13,98J y 23,31J respectivamente.

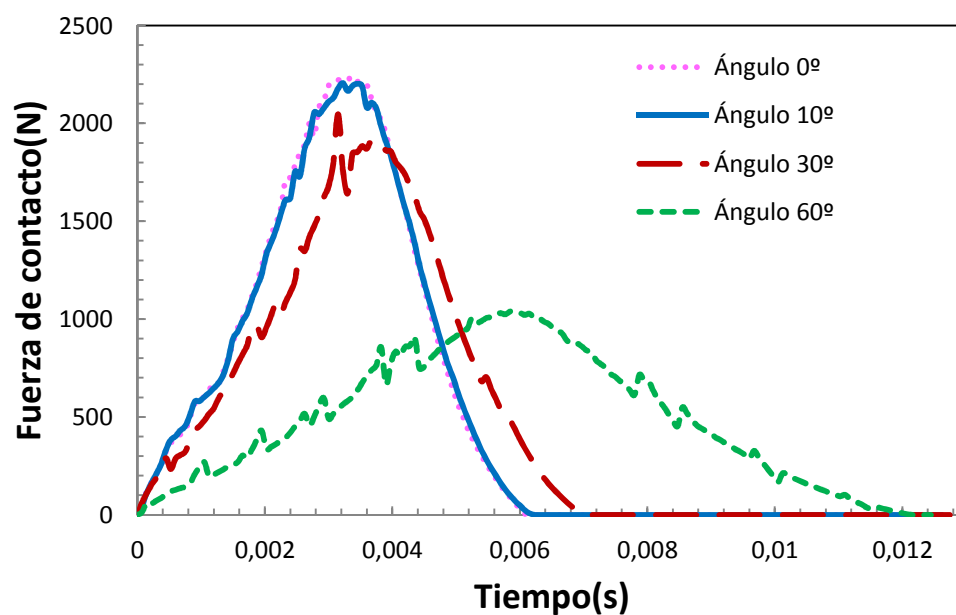


Fig. 55. Comparación de fuerza de contacto en función del tiempo para impacto oblicuo de 10°, 30° y 60°. Energía de 3,93 J.

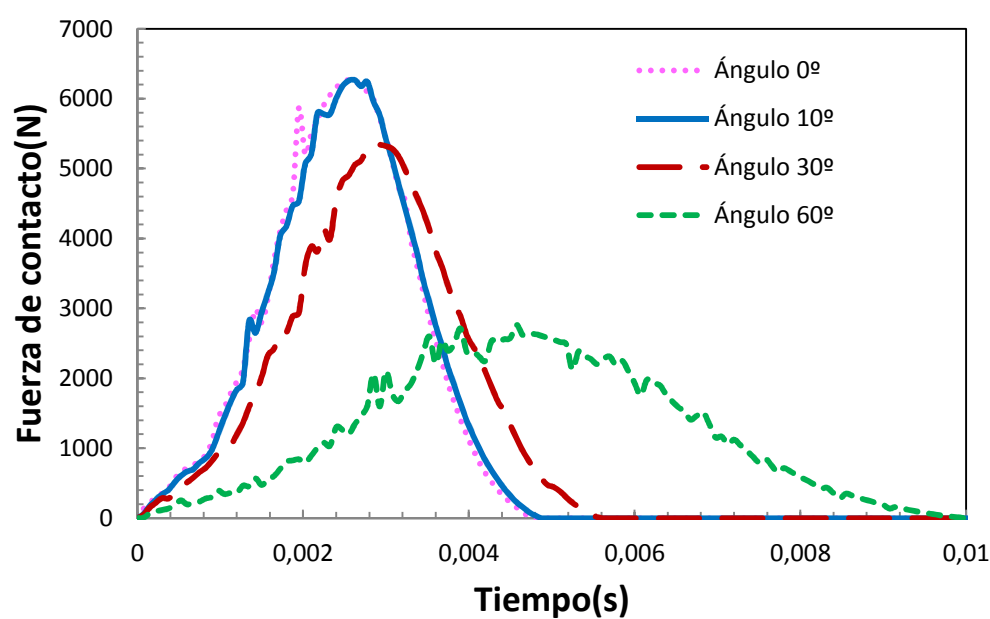


Fig. 56. Comparación de fuerza de contacto en función del tiempo para impacto oblicuo de 10°, 30° y 60°. Energía de 13,98 J.

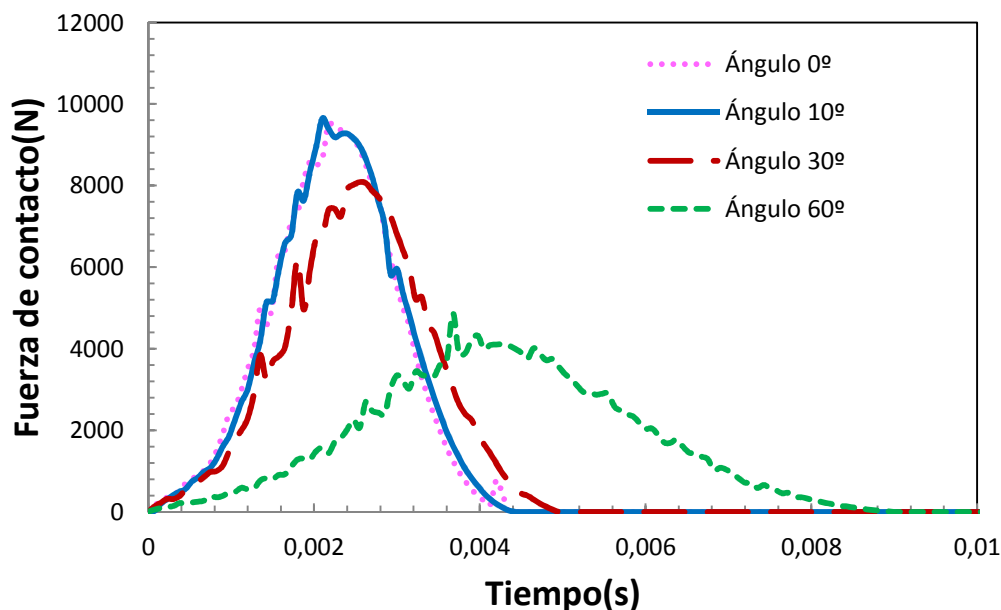


Fig. 57. Comparación de fuerza de contacto en función del tiempo para impacto oblicuo de 10°, 30° y 60°. Energía de 23,31 J.

La curva de la fuerza para el ángulo de impacto de 10°, es bastante parecida al caso de impacto perpendicular. La fuerza de contacto disminuye cuando aumenta el ángulo de impacto, esto ocurre de manera más brusca cuanto mayor es el ángulo, ya que en el impacto con ángulo de 30° de inclinación, la fuerza de contacto disminuye un 17,7% en comparación a los resultados obtenidos para un impacto normal. Si el impacto incide con un ángulo de 60°, la fuerza disminuye un 56%.

También el tiempo de contacto aumenta con el ángulo de impacto, esto sucede en mayor medida para ángulos mayores. Al comparar el impacto a 30° de inclinación con el caso de impacto normal, el tiempo aumenta un 14,4%, mientras que si se compara con el ángulo a 60°, la diferencia es notablemente mayor.

En la figura 58 se compara la energía de impacto con la energía residual, que es la energía del proyectil tras el impacto con la placa.

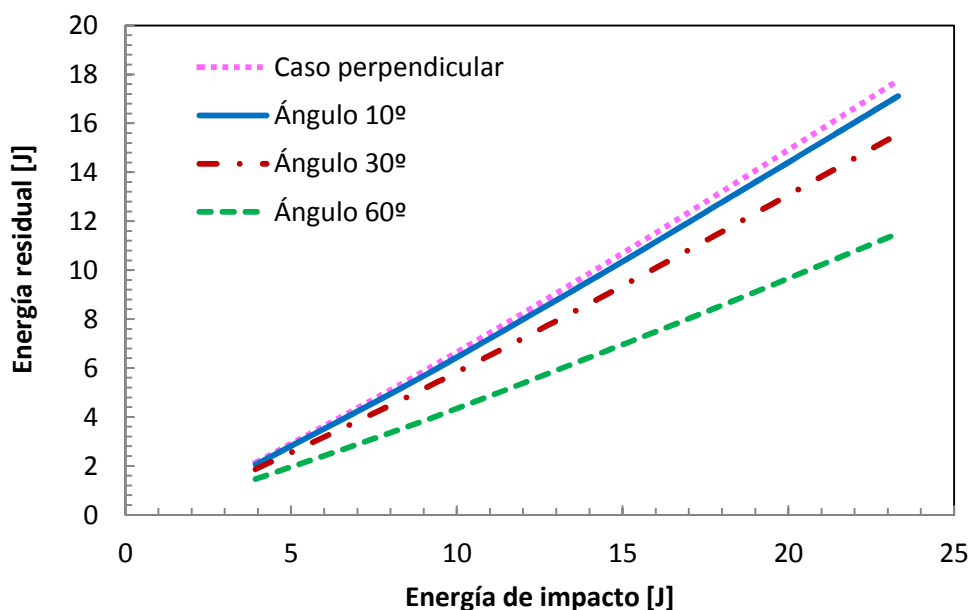


Fig. 58. Comparación de la energía residual (J) con la energía de impacto (J) para cada ángulo de impacto.

En la figura 58 se compara el valor de la energía residual frente a la energía de impacto para todos los ángulos mencionados anteriormente. Se observa que ésta aumenta con la energía de impacto. La energía residual es menor cuanto mayor es el ángulo de impacto.

En el artículo de J. Pernas-Sánchez et al. [27] se realiza un estudio sobre impactos oblicuos, donde se calcula la velocidad residual que tiene el proyectil tras impactar con la placa a alta velocidad para varias inclinaciones de impacto. La velocidad residual tiene tendencia a disminuir con el aumento del ángulo de impacto, al igual que ocurre con la energía residual, por ello se considera que los resultados obtenidos a través de este modelo tienen sentido.

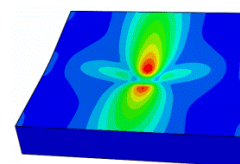
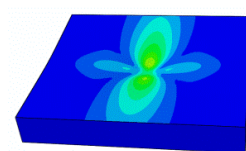
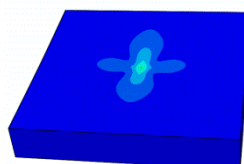
En la figura 59 se comparan los mapas de tensiones para los tres ángulos ensayados. Se observa que las tensiones disminuyen levemente según aumenta el ángulo de impacto. También se observa la orientación de las tensiones, las cuales se aproximan más a los bordes empotrados; esto tiene sentido, puesto que son las zonas donde existen mayores restricciones.



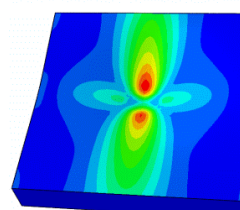
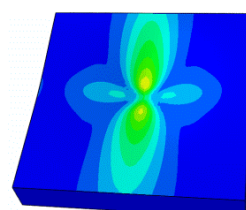
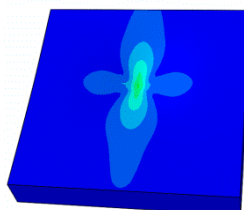
S, Mises  
SNEG, (fraction = .  
(Avg: 75%)

+	2.206e+09
+	2.022e+09
+	1.838e+09
+	1.655e+09
+	1.471e+09
+	1.287e+09
+	1.103e+09
+	9.192e+08
+	7.353e+08
+	5.515e+08
+	3.677e+08
+	1.838e+08
+	0.000e+00

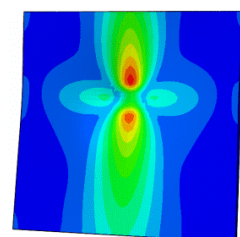
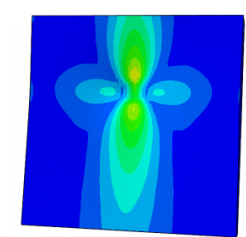
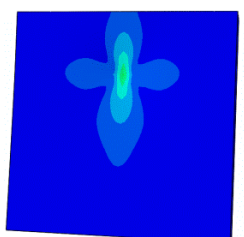
**Impacto  
oblicuo 10°**



**Impacto  
oblicuo 30°**



**Impacto  
oblicuo 60°**



a)

b)

c)

Fig. 59. Mapa de tensiones para la energía de 23,31 J, para el caso de impacto oblicuo de 10°, 30° y 60° a) 25%, b) 50%, c) 100%.

## 6. PRESUPUESTO

---

## 6.1.Presupuesto detallado

En este apartado se calcula el presupuesto necesario para realizar el modelo numérico, en él se incluirá la compra de la licencia necesaria, además de los gastos de aprendizaje y el tiempo que necesita un ingeniero para realizar el trabajo.

Adquirir la licencia del programa de simulación Abaqus, incluye el mantenimiento y asistencia técnica durante el periodo en el que la licencia este vigente, además también incluirá la documentación necesaria del programa. Con el fin de optimizar el uso del programa, el ingeniero deberá realizar un curso.

En cuanto al coste de personal, hará falta un ingeniero el cual tenga conocimientos básicos de ingeniería. Este ingeniero se dedicará a la investigación y búsqueda de la documentación necesaria para realizar el proyecto, además de realizar las simulaciones y llegar a las conclusiones finales del estudio.

Los gastos en instalaciones que se realizarán en este proyecto es principalmente la adquisición de un ordenador con suficiente potencia para poder aguantar el uso del software Abaqus sin problemas.

En la tabla 17 se muestra el presupuesto desglosado del proyecto.

**Tabla 17 Presupuesto de la modelización numérica.**

Concepto	Periodo	Precio
Programa de elementos finitos Abaqus	1 años	21950€
Mantenimiento y asistencia técnica	1 año	0€
Documentación de programa	-	0€
Coste de ingenieros	160h	1600€
Gastos en instalaciones	-	495€
Curso de introducción a Abaqus	-	1480€
Precio total(sin IVA)		25525€

## 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

## 7.1. Conclusiones

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado consiste en analizar la respuesta de placas sándwich con pieles de material compuesto cuando éstas se hallan sometidas a impactos de baja velocidad. Para ello se ha desarrollado un modelo numérico mediante el código de elementos finitos Abaqus/Explicit, llegando a varias conclusiones que se enumeran a continuación:

- El modelo fue validado mediante la comparación con los resultados experimentales obtenidos por Anderson y Madenci en 2000 [1], tanto en términos de fuerza de contacto máxima como de curvas fuerza de contacto frente a tiempo, para tres tipologías de placas sándwich con pieles de fibra de carbono y espuma polimérica. En ningún caso las predicciones del modelo superaron en 12.5% los resultados experimentales, por lo que se llegó a la conclusión de que el modelo desarrollado representa con suficiente exactitud la respuesta de placas sándwich sometidas a impacto de baja velocidad, pudiendo ser utilizado para ampliar el estudio de las mismas.
- En los tres tipos de estructuras sándwich modelizadas, se observó que la fuerza de contacto mantenía una tendencia creciente con la energía de impacto hasta que, al alcanzar una determinada energía de impacto, su valor se mantenía constante. El tiempo de contacto si sigue aumentando con la energía debido a la flexión de la placa.
- El modelo muestra que la energía absorbida por la placa sándwich crece según crece la energía de impacto, pero a partir de cierto valor, por más que se aumente la energía de impacto, la energía absorbida se mantiene constante en torno al 83% de la energía de impacto.
- Se ha observado que la zona donde impacta el proyectil es donde mayores tensiones existen. Además, el laminado superior soporta mayores esfuerzos que el núcleo y la piel inferior. La piel superior se comprime debido al impacto, mientras que la inferior se tracciona, como en un ensayo de flexión.

Tras validar el modelo desarrollado, se llevó a cabo una serie de cambios en las condiciones de contorno de la placa sándwich para ver posibles diferencias en las variables más representativas. Se pasó de una placa biapoyada (modelo original) a una placa

biempotrada y a otra empotrada en cuatro lados. De sus resultados, se destacan las siguientes observaciones:

- A diferencia del modelo biapoyado, los resultados en el rango estudiado para las dos nuevas condiciones de contorno muestran que la fuerza de contacto sigue aumentando según se incrementa la energía de impacto, sin mantenerse constante. El tiempo de contacto proyectil-placa disminuye según crece la fuerza de contacto máxima con la energía de impacto.
- El modelo empotrado en sus cuatro lados es el que presenta mayor fuerza de contacto para todas las energías de impacto estudiadas; sin embargo, la energía absorbida disminuye cuanto más se restringe el movimiento y el caso biapoyado es el que más energía de impacto absorbe para todo el rango estudiado.

Debido a la naturaleza imprevista de las cargas impulsivas, se ha llevado a cabo un estudio sobre la respuesta de la placa sándwich cuando el impacto por parte del proyectil no es perpendicular a la estructura, llegando a las siguientes conclusiones:

- El aumento del ángulo de impacto reduce la fuerza de contacto para todas las energías de impacto estudiadas, mientras que aumenta el tiempo de contacto.
- Al comparar la energía residual con el ángulo de impacto se observa que cuanto mayor es la inclinación, la energía residual se reduce, por lo que la energía absorbida por la estructura se ve incrementada.
- La inclinación del impacto se determinó como un parámetro importante dentro de las condiciones del problema a estudio, ya que las variables estudiadas presentan diferencias notables con el cambio del ángulo de impacto.

## 7.2.Trabajos futuros

Como posibles trabajos futuros que podrían ampliar el estudio realizado en este Trabajo Fin de Grado, se proponen los siguientes:

- Extender el estudio realizado mediante la realización de ensayos experimentales de impactos, ampliando los rangos estudiados en este Trabajo: velocidad, masa y diámetro del proyectil. Validar el modelo con esos nuevos ensayos experimentales.

- Estudiar placas de materiales sándwich con otras configuraciones, para ver la diferencia entre el uso de pieles reforzadas por fibra de carbono y fibra de vidrio.
- Se podría complementar el estudio del caso de impacto oblicuo con la realización de ensayos con más ángulos y cambio de la forma del proyectil.
- También se podría modificar el modelo de daño de las pieles, para intentar buscar un modelo que reproduzca mejor el daño producido en las mismas.
- Modificar la geometría del modelo, realizando el estudio para estructuras sándwich curvas. Además, se podrían realizar ensayos para diferentes curvaturas y así determinar la dependencia de la curvatura con los resultados. De esta manera se podrían simular impactos que podrían ocurrir realmente en un avión, donde la superficie no es plana.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

---



[1] Anderson T., Madenci E.; Experimental investigation of low-velocity impact characteristics of sandwich composites; Composite Structures; November 2000, Pages 239-247; Volume 50.

[2] Antonio Miravete y Luis Castejón; Grupo de Materiales Compuestos; Departamento de Ingeniería Mecánica Universidad de Zaragoza; pag 123-139.

[3] Carlos Navarro Ugena, Enrique Barbero Pozuelo; Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras › Elasticidad y Resistencia de Materiales II (2008); Material de clase; Materiales compuestos: Capítulo 1. Introducción a los materiales compuestos.

[4] Franco Stupenengo; Materiales y materias primas; 2011; capítulo 10.

[5] Inés Ivañez del Pozo; Análisis y modelización de vigas sándwich sometidas a impactos de baja velocidad; Junio 2013; Tesis doctoral UC3M.

[6] V. Crupi, G. Epasto , E. Guglielmino; Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading; International Journal of Impact Engineering; International Journal of Impact Engineering; May 2012; Volume 43, , Pages 6-15.

[7] Antonio Miravete; Materiales compuestos I; 2000.

[8] Yi-Ming Jen;Li-Yen Chang; Effect of thickness of face sheet on the bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams; Engineering Failure Analysis; June 2009; Volume 16, Issue 4, , Pages 1282-1293.

[9] F. Avilés, M. Aguilar-Montero; Mechanical degradation of foam-cored sandwich materials exposed to high moisture; Composite Structures; January 2010; Volume 92, Issue 1, , Pages 122-129.

[10] J. Zhou, Z.W. Guan, W.J. Cantwell; The impact response of graded foam sandwich structures;2013;; Composite Structures; March 2013; Volume 97, , Pages 370-377.

[11] S. Arezoo , V. L. Tagarielli, N. Petrinic , J. M. Reed ; The mechanical response of Rohacell foams at different length scales; November 2011; Journal of Materials Science; Vol. 46 Issue 21, p. 6863.

[12] Gyeong-Chan Lee, Jin-Hwe Kweon, Jin-Ho Choi; Optimization of composite sandwich cylinders for underwater vehicle application; ´Composite structures; September 2013; Volume 96 ; página 691-697.

[13] Materials news Thermoplastic sandwich makes lighter car panels; Reinforced Plastics; November 2008; Volume 52, Issue 10, Pages 13.

[14] Django Mathijsen ; Composite sandwich structures: the new milestone in bridge building; Reinforced Plastics; November-December 2013; Volume 57, Issue 6, , Pages 17- 23.

[15] Sandcore; Best Practice Guide for Sandwich Structures in Marine Applications; Edited by NewRail, University of Newcastle upon Tyne.

[16] E.A. Flores-Johnson, Q.M. Li (2011) Experimental study of the indentation of sandwich panels with carbon fibre-reinforced polymer face sheets and polymeric foam core; Composites Part B: Engineering; July 2011; Volume 42, Issue 5, Pages 1212-1219.

[17] Brenda L. Buitrago Pérez; Comportamiento de estructuras de material compuesto sometidas a cargas impulsivas; Febrero de 2012; Tesis doctoral UC3M.

[18] Jie Wang, Anthony, Hai Wang ;2013. Experimental and numerical study on the low-velocity impact behavior of foam-core sandwich panels; Composite Structures; February 2013; Volume 96 February 2013, Pages 298-311.

[19] Jin Zhou, Mohamad Zaki Hassan, Zhongwei Guan, Wesley J. Cantwell;2012; The low velocity impact response of foam-based sandwich panels; Composites Science and Technology; September 2012; Volume 72, Issue 14, 17, Pages 1781-1790.

[20] F.J. Yanga, M.Z. Hassan[2013]Scaling effects in the low velocity impact response of sandwich structures; Composite Structures; May 2013; Volume 99, May 2013, Pages 97-104.

[21] I. Ivañez, C. Santiuste , E. Barbero, S. Sanchez-Saez; Numerical modelling of foam-cored sandwich plates under high-velocity impact; Composite Structures; August 2011; Volume 93, Issue 9, Pages 2392-2399.

[22] I. Ivañez, C. Santiuste , E. Barbero, S. Sanchez-Saez Numerical modelling of foam-cored sandwich plates under high-velocity impact; Composite Structures; , August 2011; Volume 93, Issue 9, Pages 2392-2399.

[23] Rasoul Nasirzadeh, Ali Reza Sabet; Study of foam density variations in composite sandwich panels under high velocity impact loading; International Journal of Impact Engineering; , January 2014; Volume 63, Pages 129-139.

[24] M.A. Iqbala, A. Diwakara, A. Rajputa, N.K. Guptab; Influence of projectile shape and incidence angle on the ballistic limit and failure mechanism of thick steel plates; Theoretical and Applied Fracture Mechanics; December 2012; Volume 62, Pages 40-53.

[25] P. Navarro J. Aubry, S. Marguet, J.-F. Ferrero, S. Lemaire, P. Rauch; Experimental and numerical study of oblique impact on woven composite sandwich structure: Influence of the firing axis orientation; Composite Structures; May 2012; Volume 94, Issue 6, Pages 1967-1972.

[26] D.W. Zhou, W.J. Stronge ;Ballistic limit for oblique impact of thin sandwich panels and spaced plates; International Journal of Impact Engineering; November 2008; Volume 35, Issue 11, Pages 1339-1354.

[27] J. Pernas-Sánchez, J.A. Artero-Guerrero, D. Varas, J. López-Puente; Experimental analysis of normal and oblique high velocity impacts on carbon/epoxy tape laminates; Composites Part A: Applied Science and Manufacturing; May 2014; Volume 60, , Pages 24-31.

[28] Israel Cantuta Peralta; Modelización numérica del comportamiento frente a impacto en vigas de sección cajón de fibra de carbono, Marzo 2011; Proyecto fin de carrera UC3M.

[29] D.R.Ambur, C.B.Prasad, W.A. Waters; A dropped-weight apparatus for low-speed impact testing of composite structures; Experimental mechanics, Marzo 1995; pagina- 77-82.

[30] Cytec; LTM 45 series; Industrial materials; 2012.